

Untersuchung zur Dynamik neuer Lüftungssysteme in einer generischen Fahrzeugkabine und deren Einfluss auf den thermischen Komfort und die Energieeffizienz

Andreas Westhoff, Pascal Lange, Tobias Dehne

VDI Wissensforum | Stuttgart, 21. November 2018

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik
Abteilung Bodengebundene Fahrzeuge (AS-BOA)
Bunsenstr. 10, 37073 Göttingen, Germany

A large, curved image of the Earth from space occupies the right half of the slide. It shows a blue horizon, white clouds, and green landmasses, including parts of Europe and Africa.

Knowledge for Tomorrow

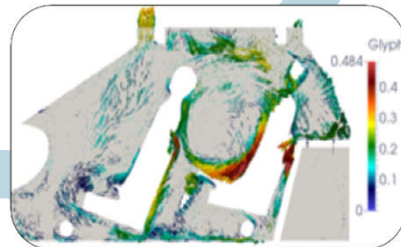
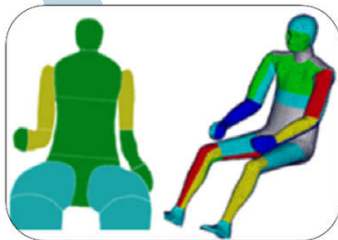
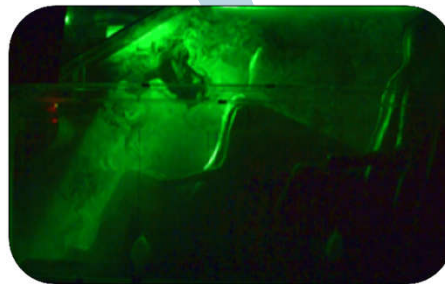
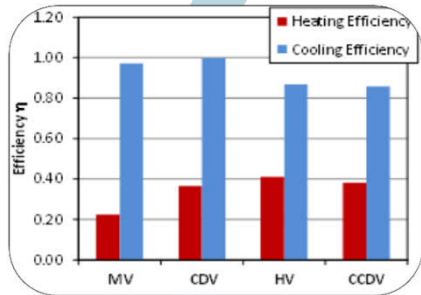
Motivation und Ziele



- Klimatisierung Fahrerkabine ist Einflussfaktor bei Elektromobilität - Reichweitenverlust ca. 50 % unter Extrembedingungen
 - Klimatisierung als Komfort- und Sicherheitsfaktor (Scheibenbeschlag)
 - Faktor im Wettbewerb der Automobilhersteller
 - Neue Anforderungen an die Klimatisierung aufgrund autonomer Fahrsysteme und Fahrzeugdesign
- Projekt „**Next Generation Car**“ (NGC) am DLR
 - Zukunftsweisende Technologien im Fahrzeugbereich
 - Weiterentwicklung und Optimierung des Thermomanagements
 - Neue Fahrzeugkonzepte für die Fahrzeuge der Zukunft



Motivation – Effektive und komfortable Pkw Klimatisierung



Neue Ventilationskonzepte
Elektromobilität / autonomes Fahren

Bestimmung und Analyse von
Strömungsstrukturen

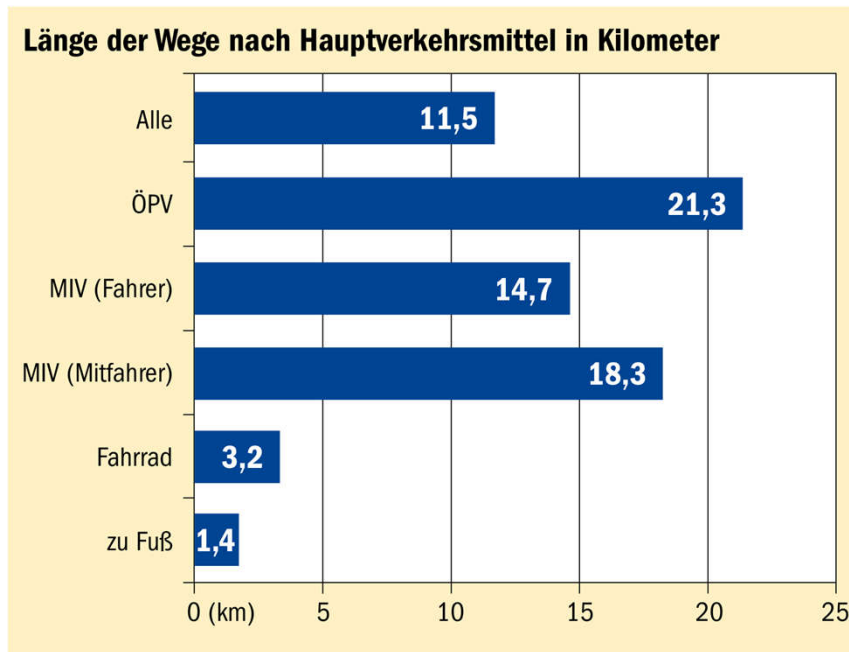
Lüftungseffizienz / Luftalter

Thermischer Komfort

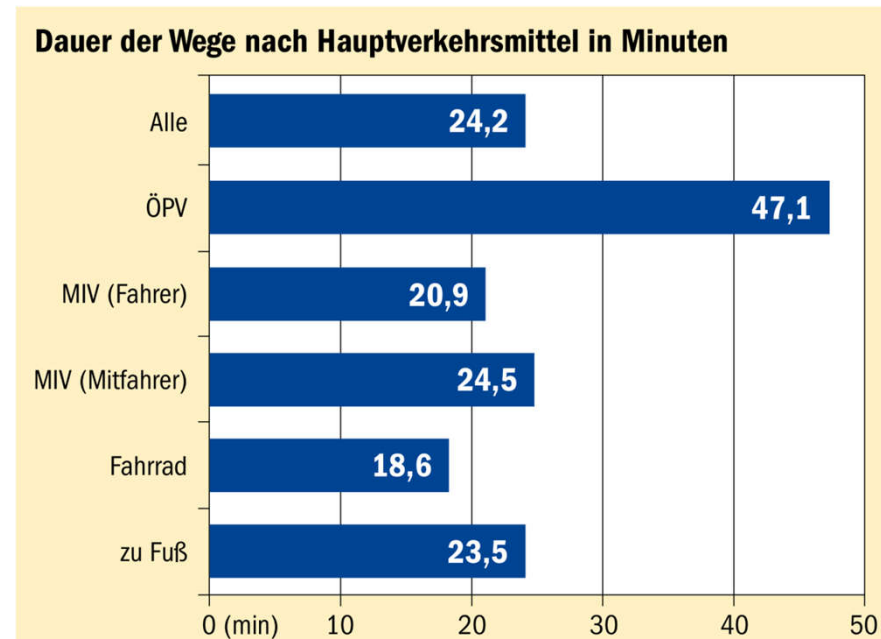
Heiz-/Kühleffizienz



Motivation – Pkw Klimatisierung auf Kurzstrecken



Quelle: ADAC – Mobilität in Deutschland (2010)



Quelle: ADAC – Mobilität in Deutschland (2010)

Ventilationskonzepte für eine effiziente Dynamik beim Heizen/Kühlen und gleichzeitig gleichem/verbessertem thermischen Komfort

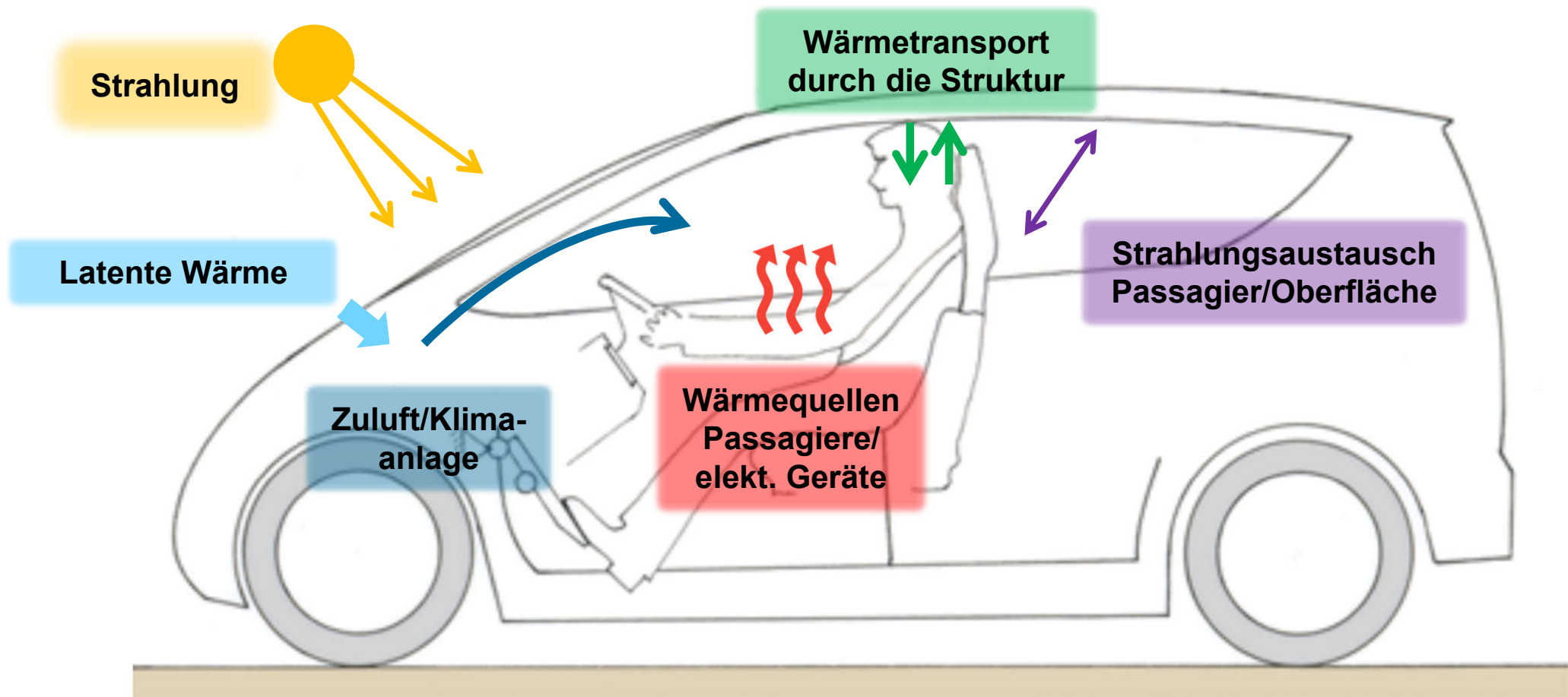


DEFINITION UND EINFLUSSGRÖSSEN

FAHRZEUGINNENRAUMVENTILATION



Wärmetransportmechanismen im Pkw

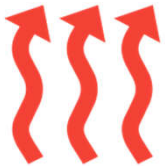


Wärmeaustausch Passagier / Kabine



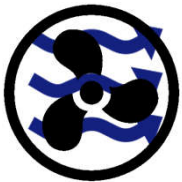
Wärmequelle Passagier

$$\dot{Q}_P = \oint (\dot{q}_G(\vec{x}) + \dot{M}_D H_D) dA$$



Thermische Konvektion

$$\dot{Q}_{TK} = f(\Delta T, \beta_L, g, \lambda_L, \nu_L, \alpha)$$



Erzwungene Konvektion

$$\dot{Q}_{FK} = f(U, \lambda_L, \nu_L, \alpha)$$



Wärmestrahlung

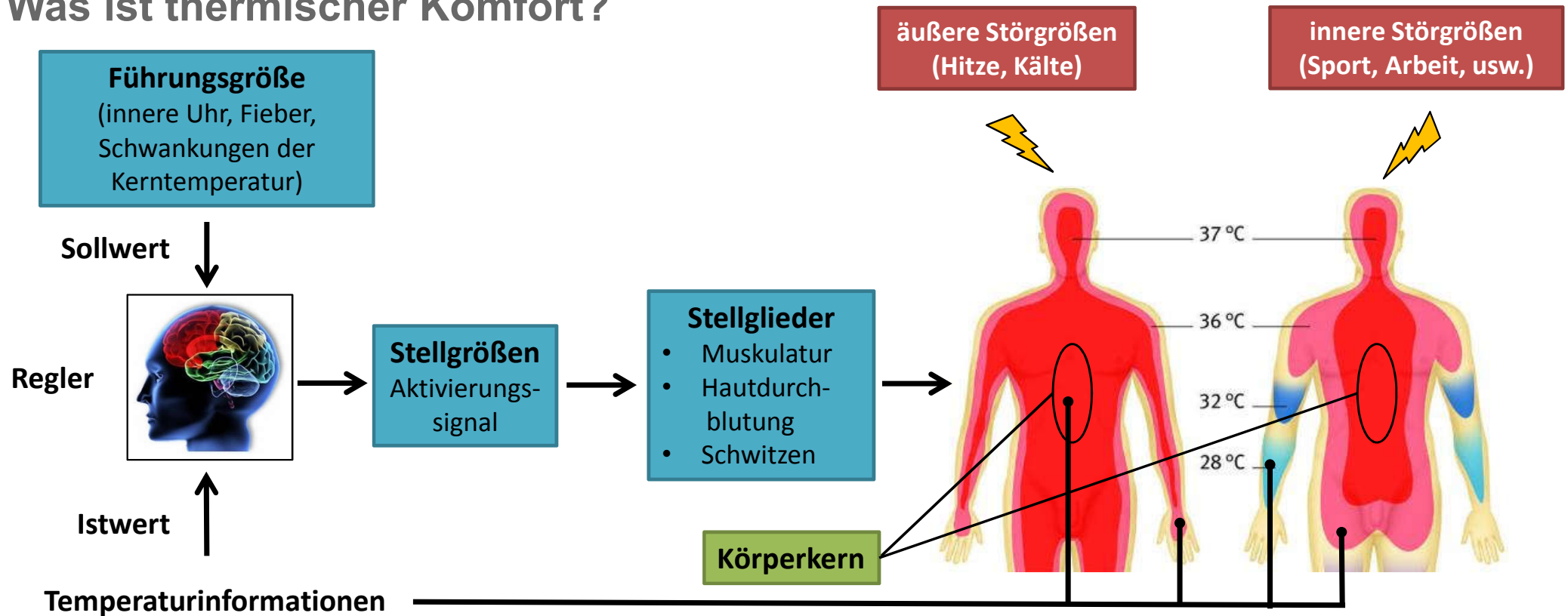
$$\dot{Q}_S = \oint \sigma \epsilon(\vec{x}) (T_P^4 - T_U^4) dA$$



Einfluss auf den thermischen Komfort und wie lässt sich dies Bewerten



Was ist thermischer Komfort?



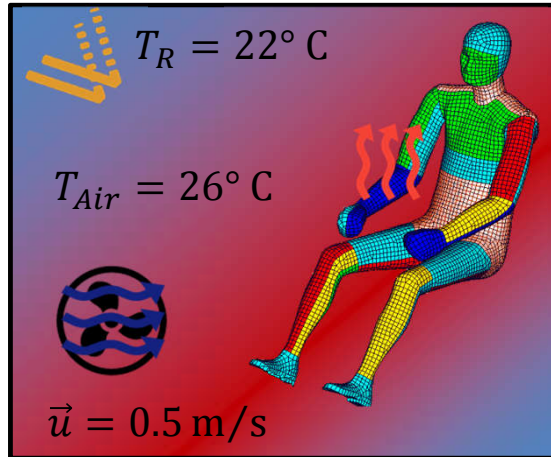
Thermischer Komfort = Möglichst geringe Eigenleistung, um Temperatur des Körperkerns bei $T = 37\text{ °C}$ konstant zu halten



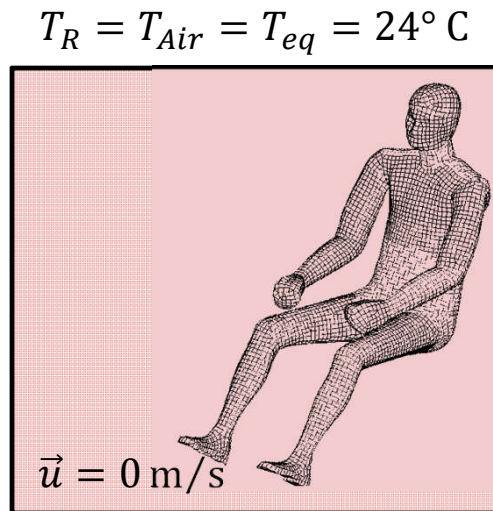
THERMISCHER KOMFORT UND MESSMITTEL THERMISCHES MENSCHMODELL



Äquivalenttemperatur



=



DIN EN ISO 14505-2:

„Die Äquivalenttemperatur ist die Temperatur eines **homogenen Raumes** mit einer **mittleren Strahlungstemperatur gleich der Lufttemperatur** und einer Luftgeschwindigkeit von null, in dem der **Wärmeverlust einer Person durch Konvektion und Strahlung** dem Wärmeverlust unter den tatsächlichen beurteilten Bedingungen entspricht.“

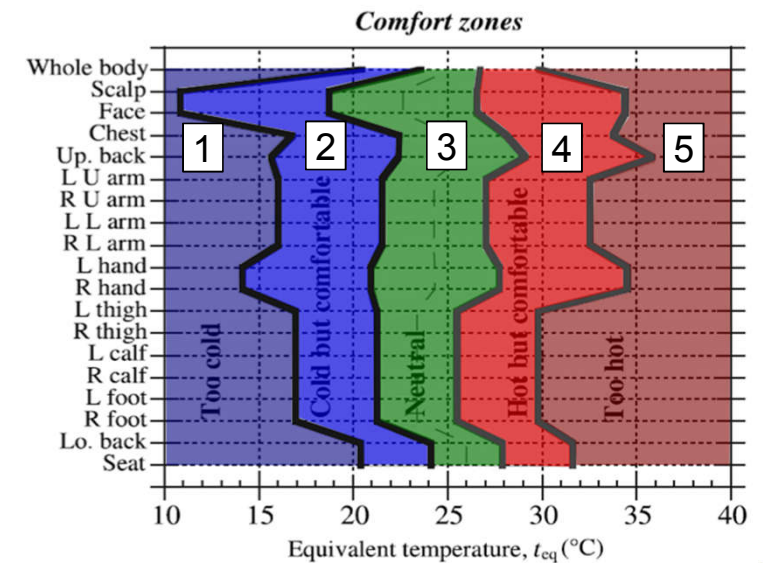
$$T_{EQ} = T_S - \frac{\dot{q}}{(\alpha_K + \alpha_S)}$$

T_S : Oberflächentemperatur

\dot{q} : Wärmestromdichte

$\alpha_K + \alpha_S$: Wärmetransferkoeffizient

Bewertung des thermischen Komfort



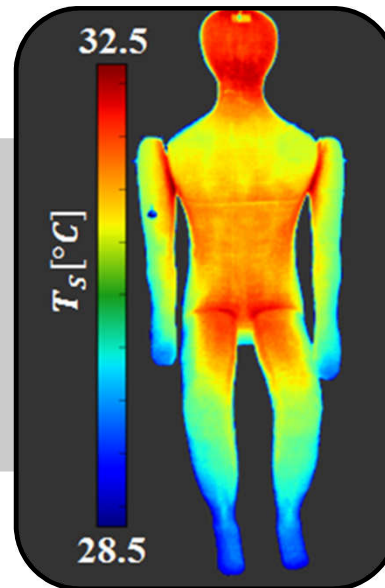
Kalibrierung thermisches Menschmodell

Passagiermodell



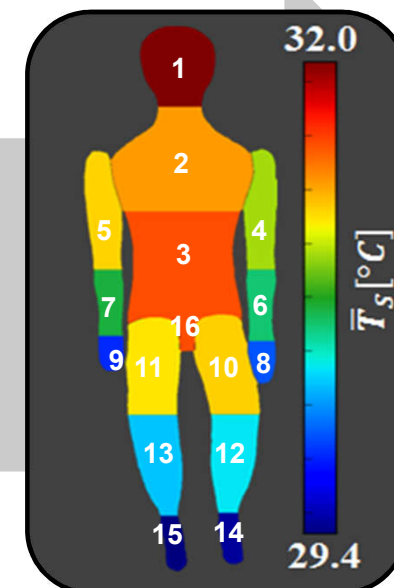
berührungsfrei platziert innerhalb einer isotherm temperierten Box bei konstanter Heizleistung P_{TM}

Oberflächentemperatur



Oberflächentemperatur T_S via IR-Thermografie für verschiedene Wandtemperatur

Segmenttemperatur

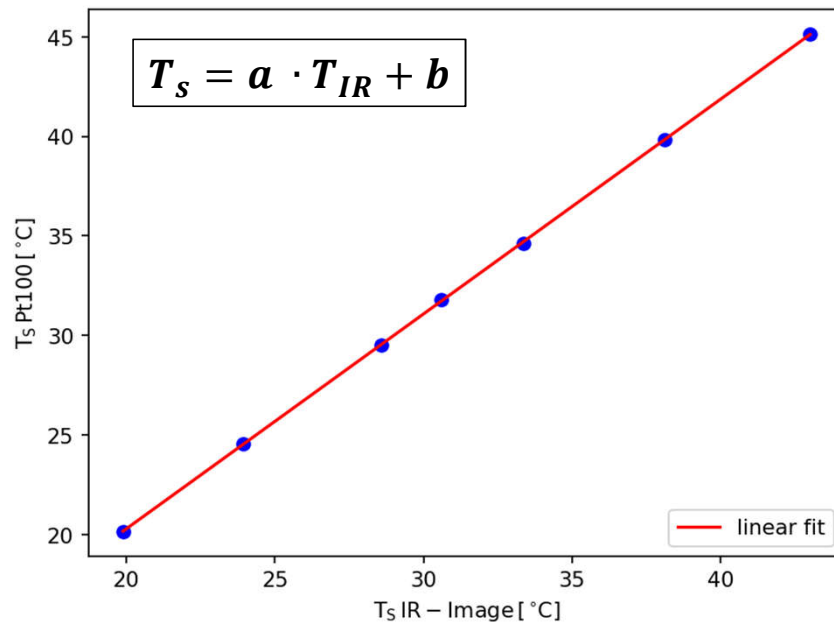


Unterteilung in 16 Körpersegmente mit räumlich gemittelte Temperatur jeder Zone



Kalibrierfehler / Korrekturen

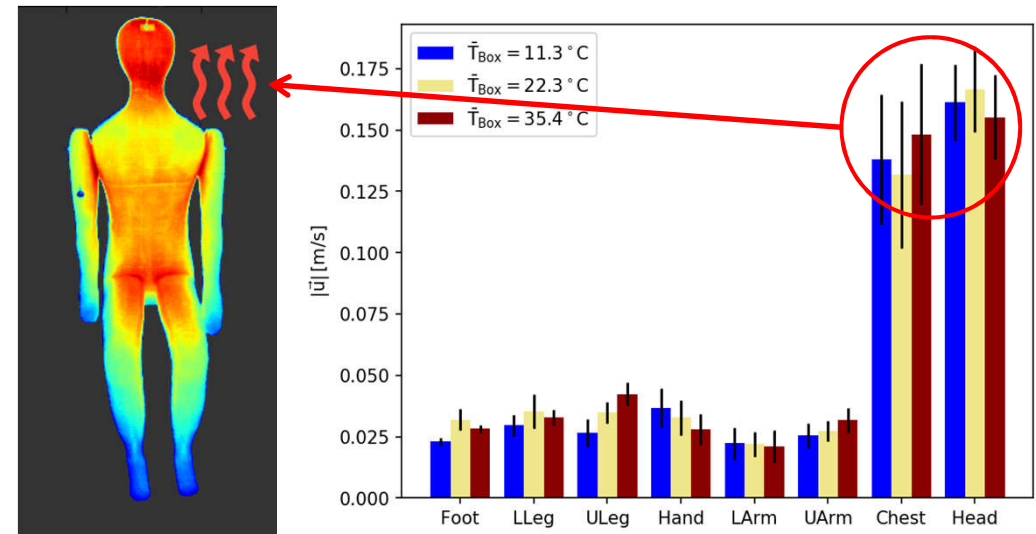
Messungenaugigkeit IR-Thermografie



Messungenaugigkeit durch:

- Emissionskoeffizient TM (ϵ)
- Hintergrundtemperatur
- Messfehler IR-Kamera

Vorgabe Normumgebung

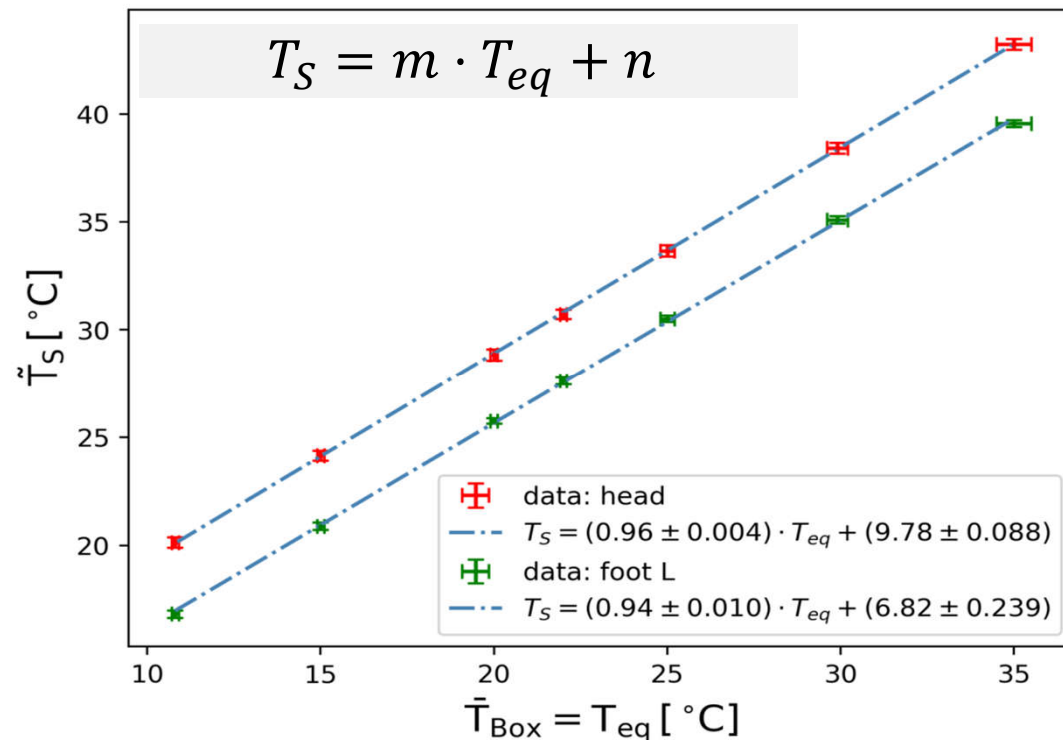


$$\tilde{T}_s = \frac{\alpha}{\alpha_N} (T_s - T_{Luft}) + T_{Luft}$$

- Fehler in der Äquivalenttemperatur durch Verletzung der Vorgaben für die Normumgebung $u < 0.1 \text{ m/s}$
- Im Schulterbereich Geschwindigkeit Auftriebsströmungen $u > 0.1 \text{ m/s}$



Kalibrierfaktoren für die Körperzonen



- lineare Abhängigkeit zw. T_{eq} und T_S ; Steigung ≈ 1
- Kurven unterscheiden sich primär durch Offset
- Fehler beinhaltet: Sensorungenauigkeit und Fehler der Regressionsanalyse

Körperzonen	m [-]	n [$^{\circ}C$]
Kopf	0.955 ± 0.004	9.78 ± 0.09
Brust	0.953 ± 0.003	8.85 ± 0.07
Bauch	0.958 ± 0.003	8.91 ± 0.06
Oberarm L	0.965 ± 0.003	8.36 ± 0.07
Oberarm R	0.966 ± 0.004	8.10 ± 0.11
Unterarm L	0.971 ± 0.001	7.66 ± 0.04
Unterarm R	0.969 ± 0.002	7.61 ± 0.06
Hand L	0.973 ± 0.001	6.71 ± 0.04
Hand R	0.969 ± 0.004	6.91 ± 0.09
Oberschenkel L	0.959 ± 0.002	8.44 ± 0.06
Oberschenkel R	0.957 ± 0.003	8.59 ± 0.08
Unterschenkel L	0.945 ± 0.004	7.74 ± 0.10
Unterschenkel R	0.941 ± 0.006	7.94 ± 0.16
Fuss L	0.942 ± 0.010	6.82 ± 0.24
Fuss R	0.937 ± 0.010	6.99 ± 0.24



Messfehler Äquivalenttemperatur

Fehler Oberflächentemperatur

$$\delta T_s = \sqrt{\left(\frac{\partial T_s}{\partial m} \delta m\right)^2 + \left(\frac{\partial T_s}{\partial b} \delta(b + b_{Pt100})\right)^2}$$

Fehler
Temperatursensor

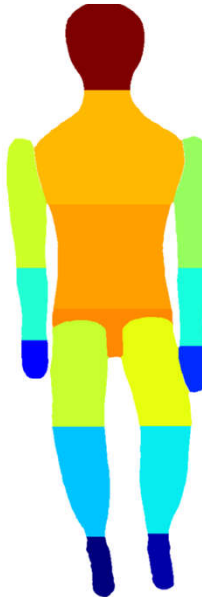
Messfehler IR-Thermografie

$$\delta \tilde{T}_s = \sqrt{\left(\frac{\partial \tilde{T}_s}{\partial T_s} \delta T_s\right)^2 + \left(\frac{\partial \tilde{T}_s}{\partial T_{air}} \delta T_{air}\right)^2 + \left(\frac{\partial \tilde{T}_s}{\partial \vec{u}} \delta \vec{u}\right)^2}$$

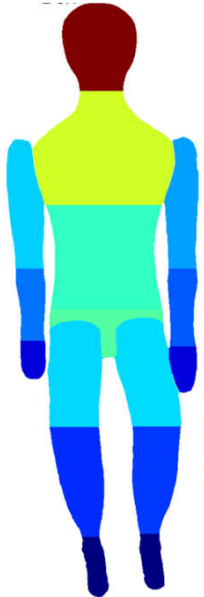
Gesamtfehler (IR, Wandtemperatur, Geschwindigkeit)

Fehler Äquivalenttemperatur

$$\delta T_{Eq} = \sqrt{\left(\frac{\partial T_{Eq}}{\partial \tilde{T}_s} \delta \tilde{T}_s\right)^2 + \left(\frac{\partial T_{Eq}}{\partial T_{bEq}} \delta b_{Eq}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_{Eq}}{\partial T_{mEq}} \delta m_{Eq}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_{Eq}}{\partial \dot{q}} \delta \dot{q}\right)^2}$$



$\delta \tilde{T}_s < 0.7K$



$\delta T_{eq} < 0.8K$

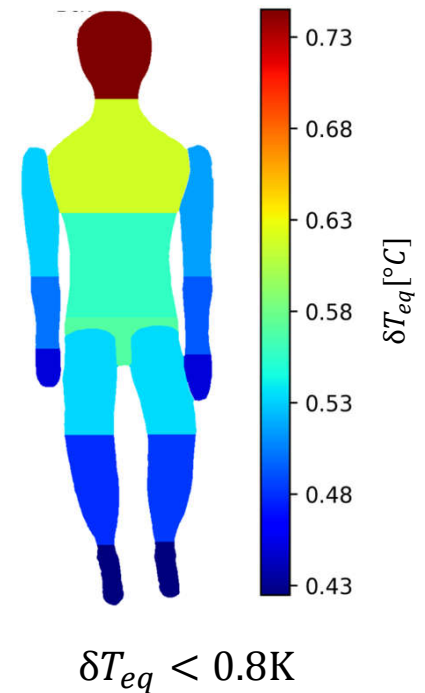
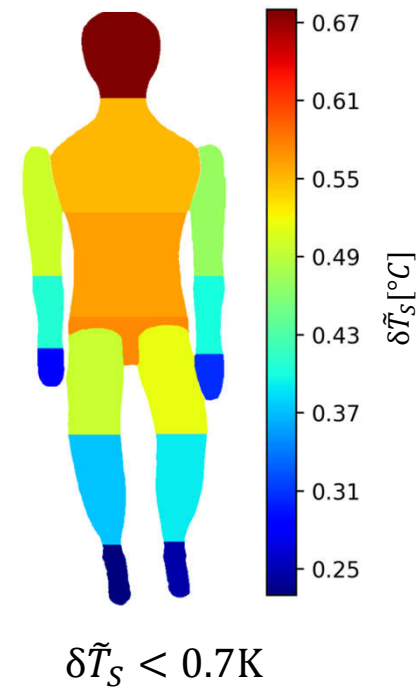
Oberfläche

Kalibriergerade

Heizleistung TM

Fehler Oberflächentemperatur

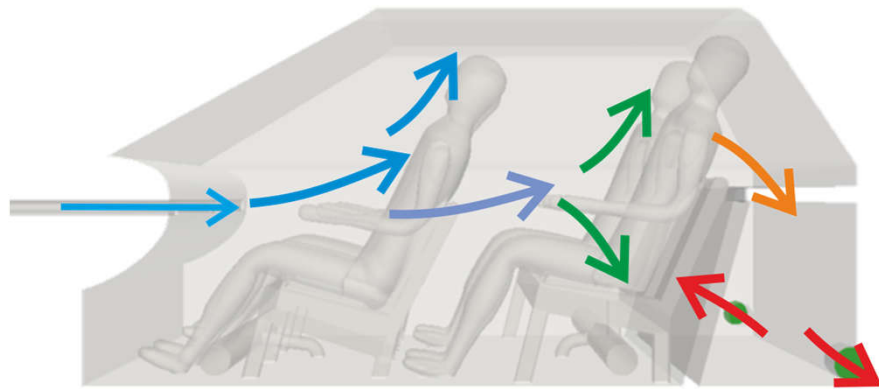
Fehler Äquivalenttemperatur



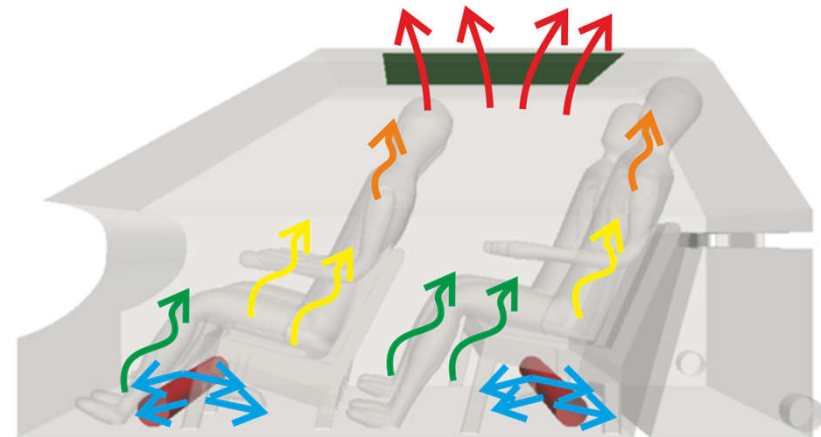
DEFINITION UND CHARAKTERISIERUNG DER LÜFTUNGSKONZEPTE



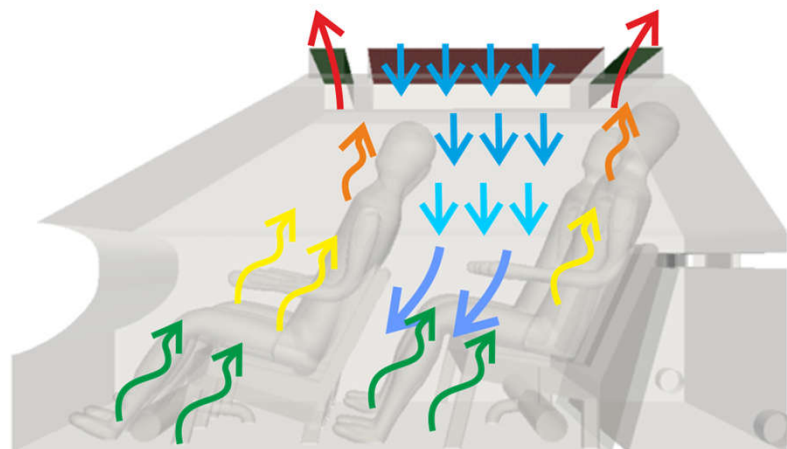
Lüftungskonzepte



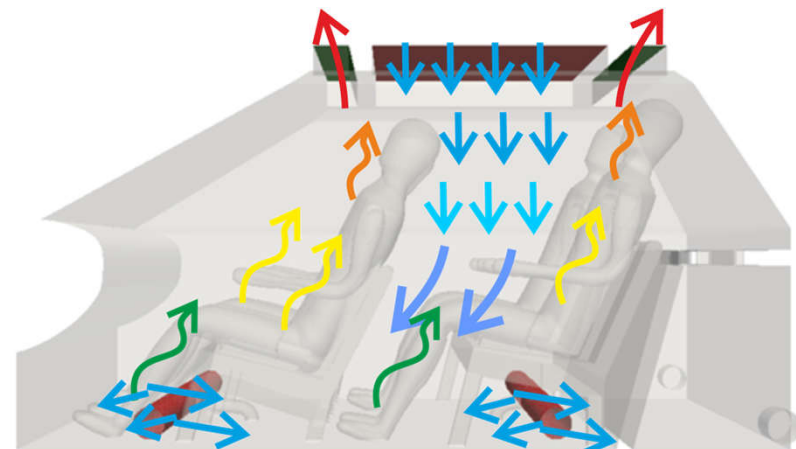
Mischlüftung (MV)



Bodenseitige Verdrängungslüftung (CDV)



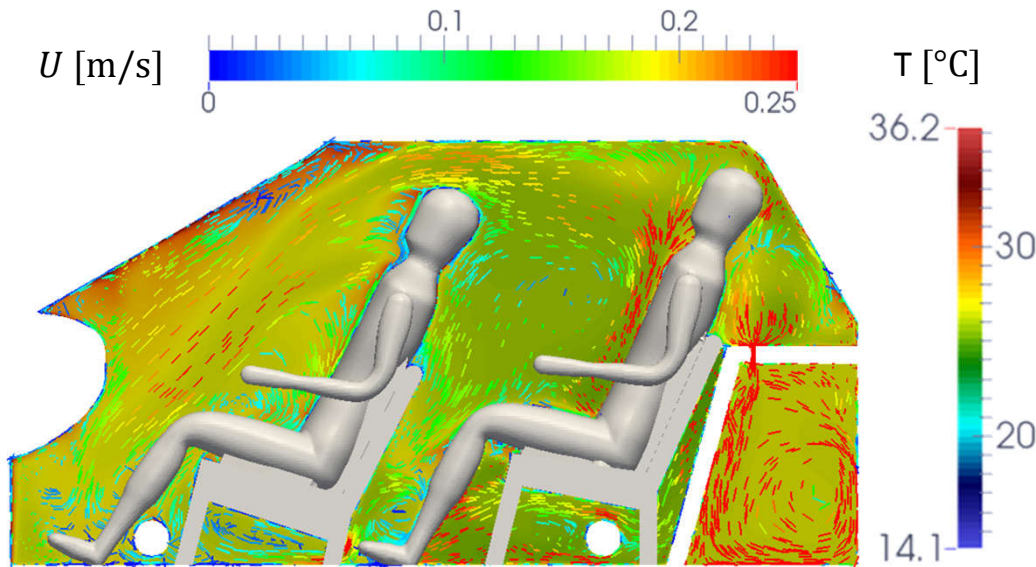
Niederimpuls Deckenlüftung (LMCV)



Hybride Lüftung (HV)



Mischlüftung – Mixing Ventilation (MV)

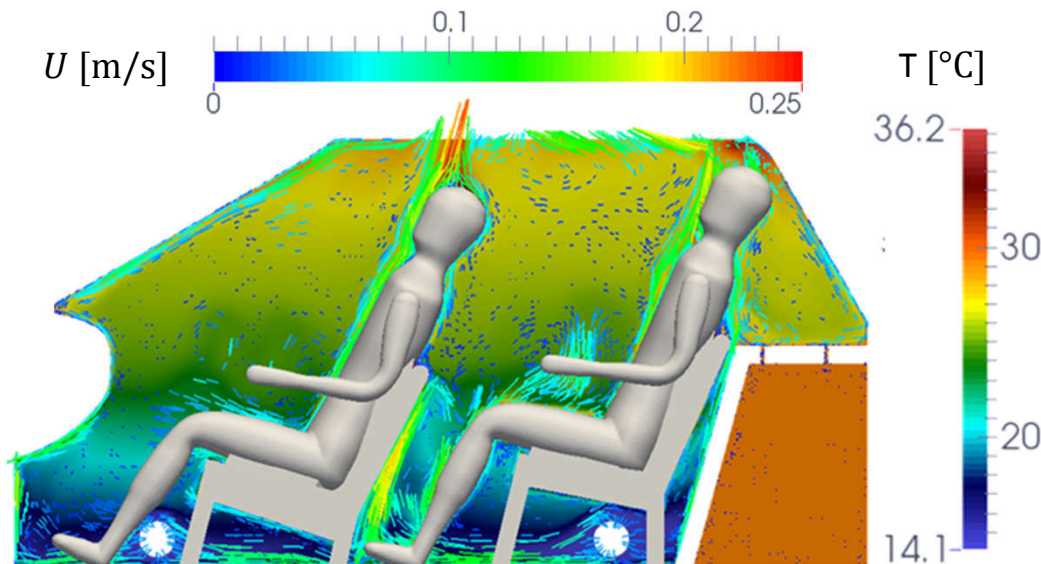


- Gute Regulierbarkeit
- Identische Bedingungen in der ganzen Kabine
- Große Temperaturdifferenz zwischen Kabine und Zuströmung
- Gefahr einer Kurzschlussströmung
- Niedrige Lüftungseffizienz
- Zugluft

- Zuluft als Freistrahл mit hohem Impuls/hoher Geschwindigkeit
- Erzeugung eines großen Druckgefälles (erzwungene Konvektion)
- Mischung und Wärmetransport durch kleinskalige Wirbelstrukturen
- Lufttemperatur und Feuchte gleichmäßig verteilt - Luftqualität theoretisch überall in der Kabine identisch



Bodenseitige Verdrängungslüftung – Cabin Displacement Ventilation (CDV)

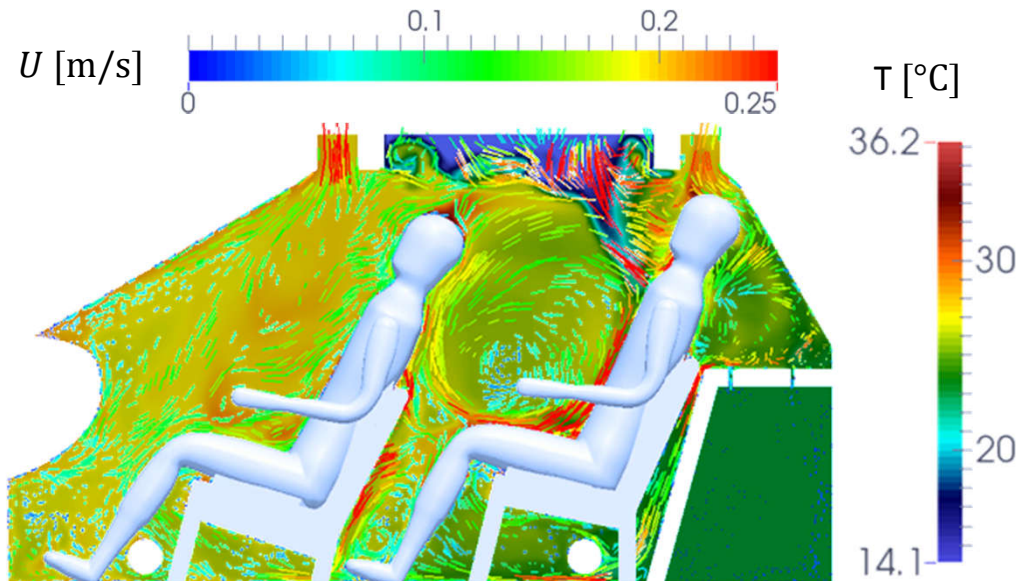


- Thermische Behaglichkeit (niedriger Turbulenzgrad)
- hohe lokale Ventilationseffektivität - Luftvolumen des gesamten Raumes muss nicht umgewälzt werden
- Abnehmende Kühlleistung bei hohen thermischen Lasten
- Im Sommer Gefahr von kalten Füßen

- Zuluft mit niedrigem Impuls im Bodenbereich eingebracht - am Boden bildet sich ein Frischluftsee
- Warme Flächen oder Passagier induzieren durch Wärmeabgabe eine Auftriebsströmung, die die Frischluft vom Boden nachzieht
- Verbrauchte Luft verlässt die Kabine im Deckenbereich
- Kleine Temperaturdifferenz zwischen Kabine und Zuluft
- Geschwindigkeit kleiner 0,05 m/s aus dem Luftauslass



Niedrigimpuls Deckenlüftung – Low Momentum Ceiling Ventilation (LMCV)

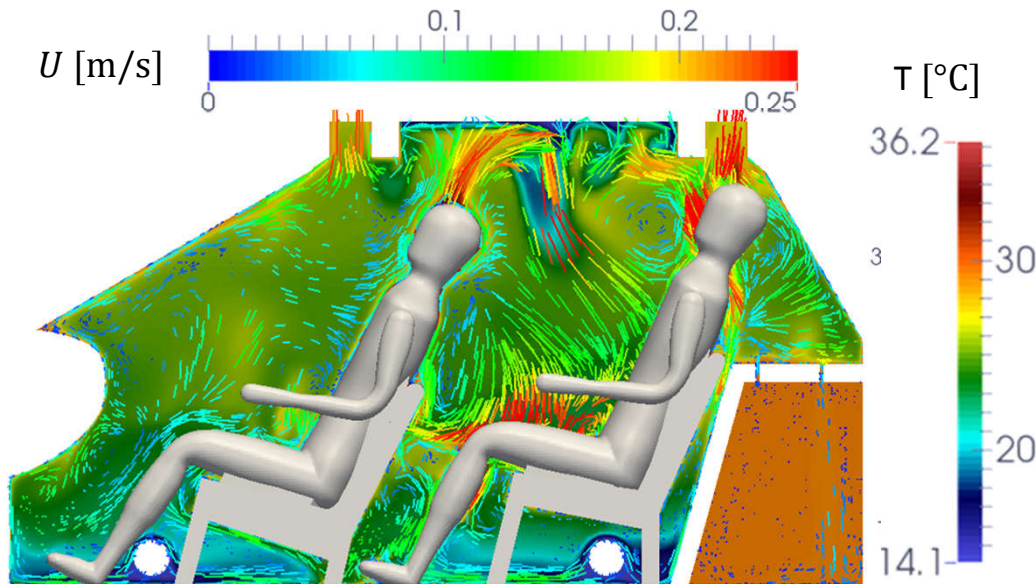


- Thermische Behaglichkeit (niedriger Turbulenzgrad)
- Hohe Ventilationseffizienz
- Hohe Kühl-/Heizeffizienz
- Zuluftsystem im Fahrzeugdach
- Bei schlechter Auslegung hoher vertikaler Temperaturgradient

- Belüftung über Rieseldecke mit niedrigem Impuls
- Verdrängung der verbrauchten Luft
- Warme Flächen oder Passagier induzieren durch Wärmeabgabe eine Auftriebsströmung, die die Frischluft vom Boden nachzieht, und die verbrauchte Luft verlässt die Kabine im Deckenbereich
- Temperaturgradient zwischen Boden/Decke (zusätzlich Auf-/Abtriebsströmung)
- Geschwindigkeit kleiner 0,05 m/s aus dem Luftauslass

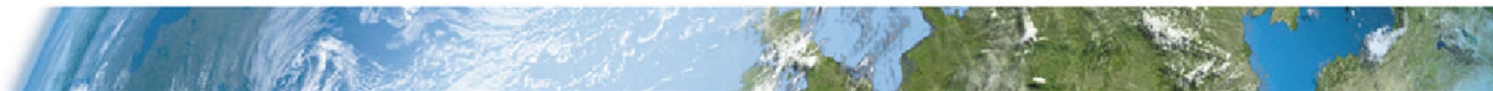


Hybride Lüftung – Hybride Ventilation (HV)



- Hohe thermische Behaglichkeit (niedriger Turbulenzgrad)
- Betrieb mit lokal variablem Volumenstrom
- Hohe Ventilationseffizienz
- Hohe Kühl-/Heizeffizienz
- Erhöhter Aufwand für das Zuluftsystem

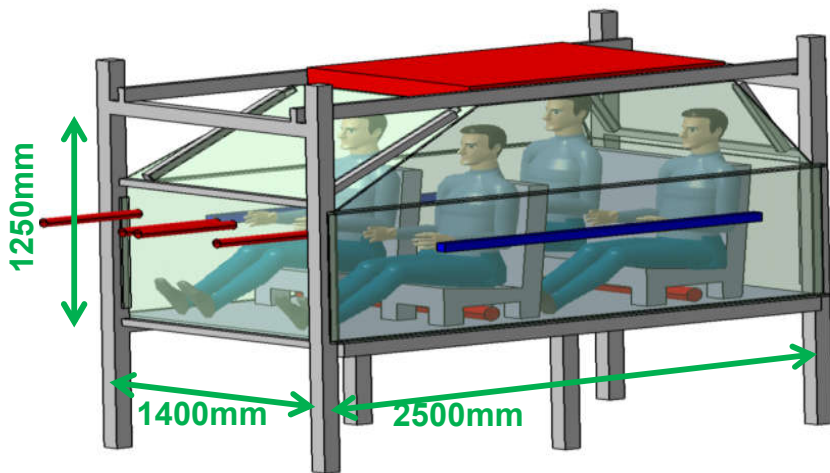
- Kombination aus Quellbelüftung, niedrigimpuls Deckenlüftung und bodenseitiger Verdrängungslüftung
- Frischluft wird impulsarm am Boden und an der Decke eingebracht
- Verbrauchte Luft verlässt die Kabine im Deckenbereich
- Volumenstromverhältnis an Frischluft zwischen Decke und Boden einstellbar



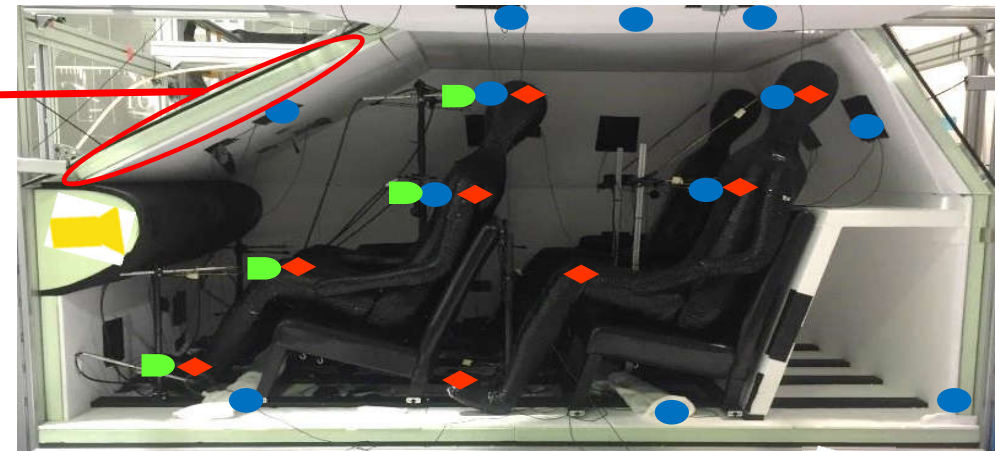
VERSUCHSTRÄGER GENERISCHE FAHRZEUGKABINE UND PARAMETER / RANDBEDINGUNGEN



Generische Fahrzeugkabine (GFZK)



- innere Abmessungen entsprechen typischen Mittelklassewagen
- hohe Flexibilität für Integration neuartiger Belüftungssysteme
- 4 thermische Passagiermodelle installiert
- Isotherm temperierbare Seitenwände zur Simulation verschiedener Umgebungsbedingungen



● Pt100 ■ Geschwindigkeit ◆ RH-Sens 📷 IR-Cam



Parameter und Randbedingungen

Sommerszenario



Zulufttemperatur : $T_Z = 14, \mathbf{15}, 16^\circ\text{C}$
 Umgebungstemperatur : $T_U = 31^\circ\text{C}$
 Wärmeabgabe TM : $\dot{Q} = 75\text{W}$
 Volumenstrom Zuluft : $\dot{V} = 28 \text{ l/s}$

	$\langle T_Z \rangle$	$\langle T_U \rangle$	$\langle \dot{Q}_{TM} \rangle$	$\langle \dot{V}_Z \rangle$	$\langle U \rangle$
	[°C]	[°C]	[W]	[l/s]	[m/s]
MV	15.0(7)	31.1(6)	4 x 75	28.0(2)	2.07
CDV	14.8(4)	30.8(3)	4 x 75	28.0(2)	0.02
LMCV	15.4(6)	30.7(3)	4 x 75	28.0(2)	0.02
HV _{50/50}	15.3(8)	30.6(2)	4 x 75	28.0(2)	0.02

Winterszenario



Zulufttemperatur : $T_Z = \mathbf{23}, 25, 28^\circ\text{C}$
 Umgebungstemperatur : $T_U = 7^\circ\text{C}$
 Wärmeabgabe TM : $\dot{Q} = 75\text{W}$
 Volumenstrom Zuluft : $\dot{V} = 28 \text{ l/s}$

	$\langle T_Z \rangle$	$\langle T_U \rangle$	$\langle \dot{Q}_{TM} \rangle$	$\langle \dot{V}_Z \rangle$	$\langle U \rangle$
	[°C]	[°C]	[W]	[l/s]	[m/s]
MV	22.8(1)	7.2(1)	4 x 75	28.0(2)	2.07
CDV	23.0(1)	6.8(1)	4 x 75	28.0(2)	0.02
LMCV	22.8(1)	6.9(1)	4 x 75	28.0(2)	0.02
HV _{50/50}	23.0(1)	7.0(1)	4 x 75	28.0(2)	0.02

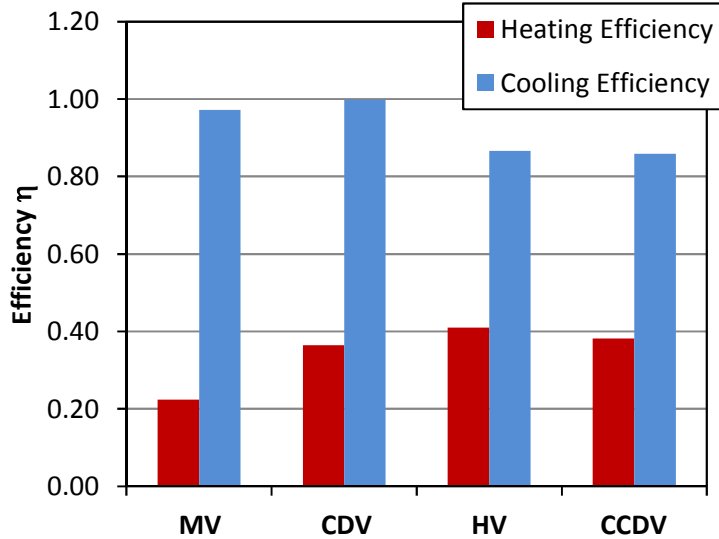
Messbeginn (thermisches Gleichgewicht) nach 150 min bei vorgegebenen Randbedingungen (mit beheizten thermischen Menschmodellen)



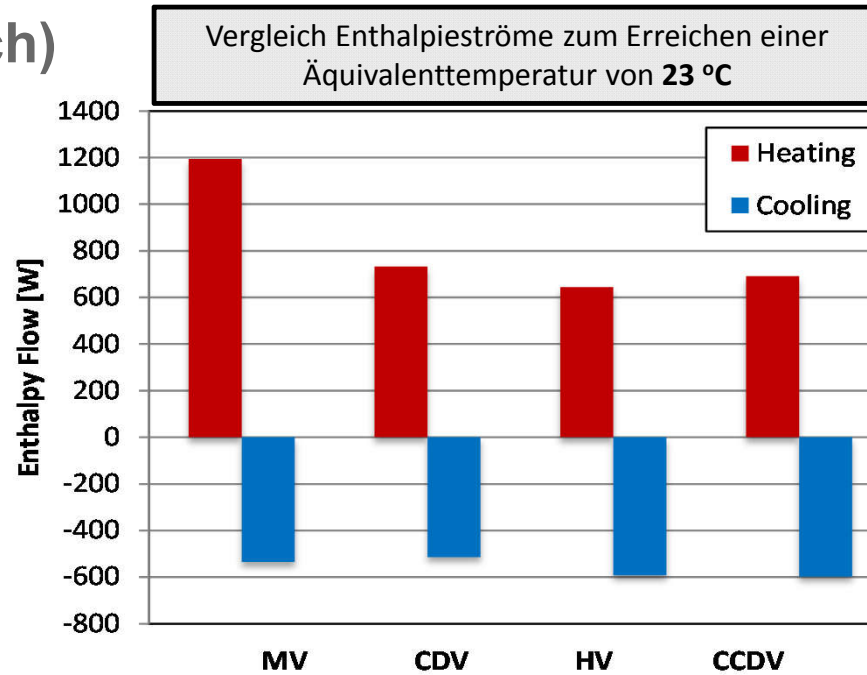
DYNAMIK UND THERMISCHER KOMFORT BEIM HEIZEN UND KÜHLEN



Heiz/Kühleffizienz (statisch)



- Kühleffizienz ist **deutlich größer** als Heizeffizienz
- Neue Belüftungssysteme zeigen vor allem beim Heizen Effizienzvorteile
- Heizeffizienz von HV beträgt **180 %** im Vergleich zu MV



- Vorteile vertikale Lüftungsvarianten beim Heizen
- Unterschiede zwischen Heiz- und Kühlfällen relativieren sich
- Geringe Effizienz der Heizfälle wird durch interne Wärmelasten teilweise kompensiert
- Bei **HV** beträgt der Enthalpiebedarf zum Heizen lediglich **54 %** von **MV**

Wirkungsgrad

$$\eta := \frac{T_{Eq} - T_U - \frac{\dot{q}_{TM}}{q_V \varrho c_p}}{T_Z - T_U}$$

$$\eta = \eta(\dot{q}_P, T_U) = \frac{dT_{Eq}}{dT_Z}$$

$$\eta = \frac{\text{Enthalpie zum Passagier}^*}{\text{Enthalpie in die Kabine}}$$

*korrigiert hinsichtlich Eigenheizung des th. PM

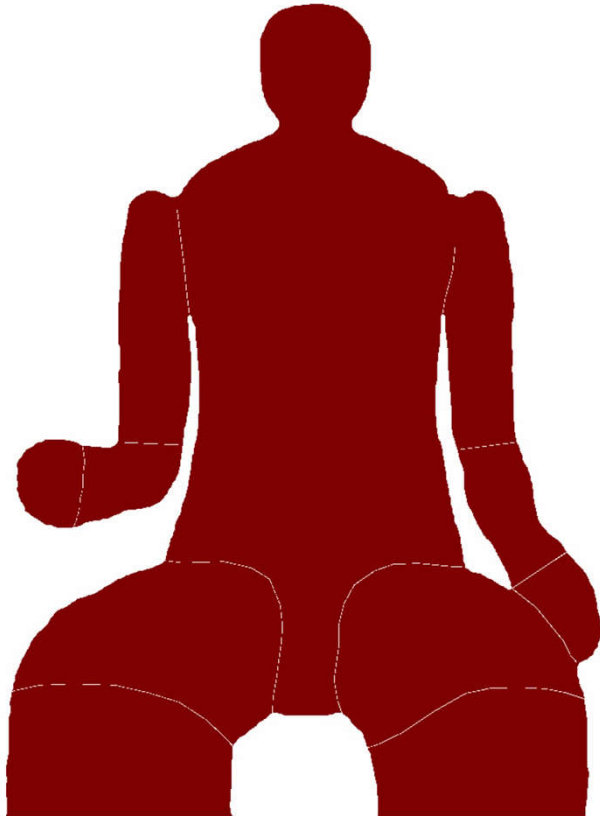
Enthalpie

$$\dot{H} = \frac{(T_{eq} - T_{amb}) q_V \varrho c_p - P_H}{\eta}$$



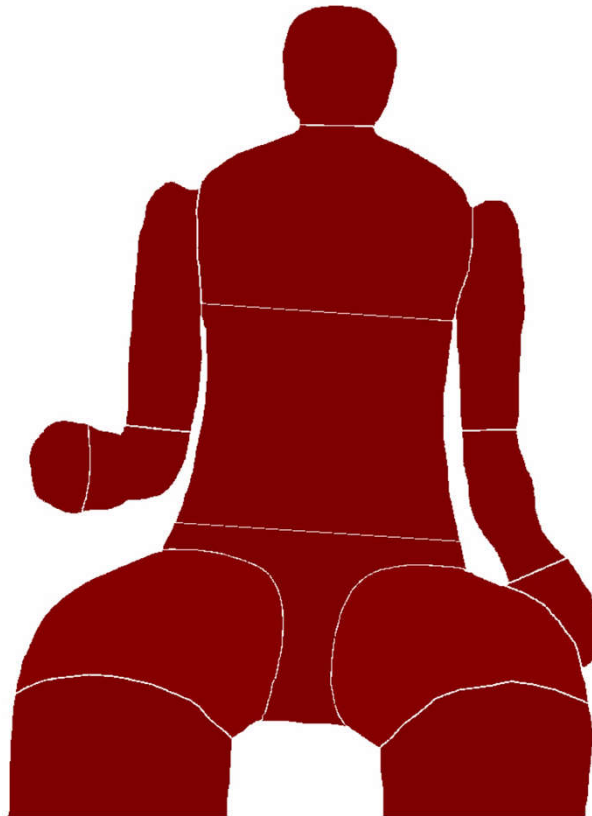
Äquivalenttemperatur Sommerfall (Fahrersitz)

time [min] : 0.0



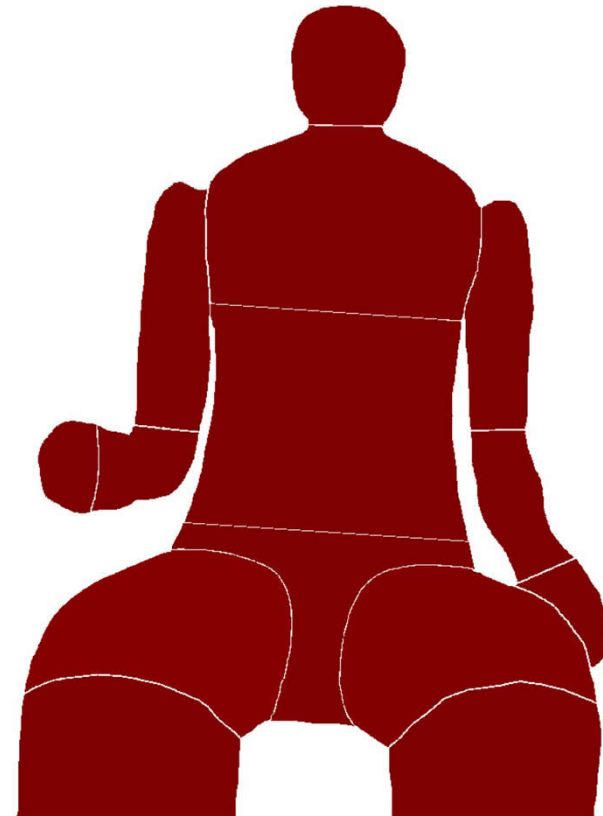
Mischlüftung

time [min] : 0.0

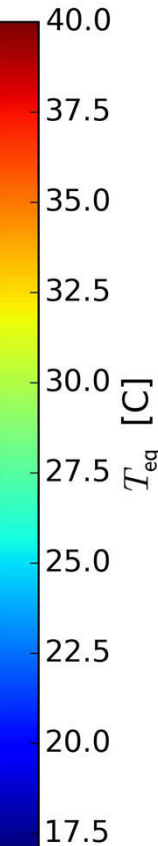


Bodenseitige Verdrängungslüftung

time [min] : 0.0



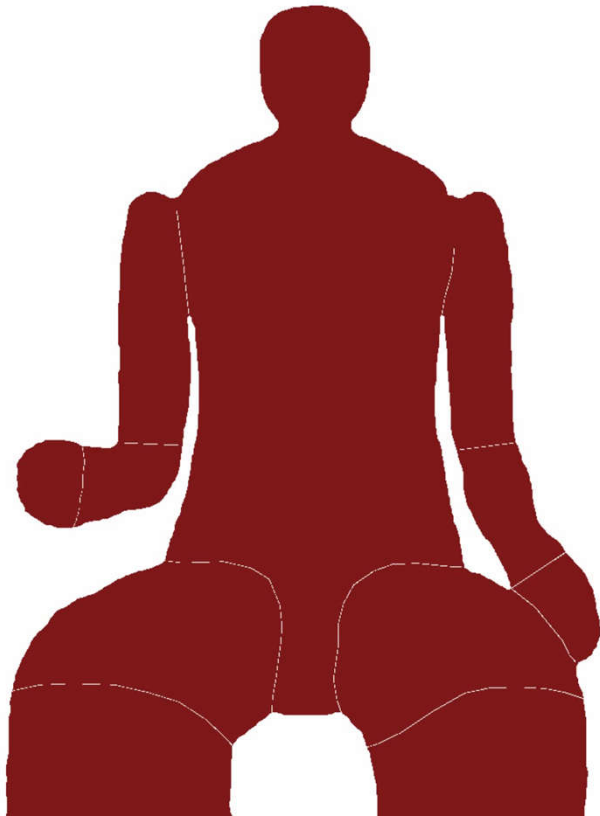
Niederimpuls Deckenlüftung



Thermischer Komfort DIN14505 Sommerszenario (Fahrsitz)

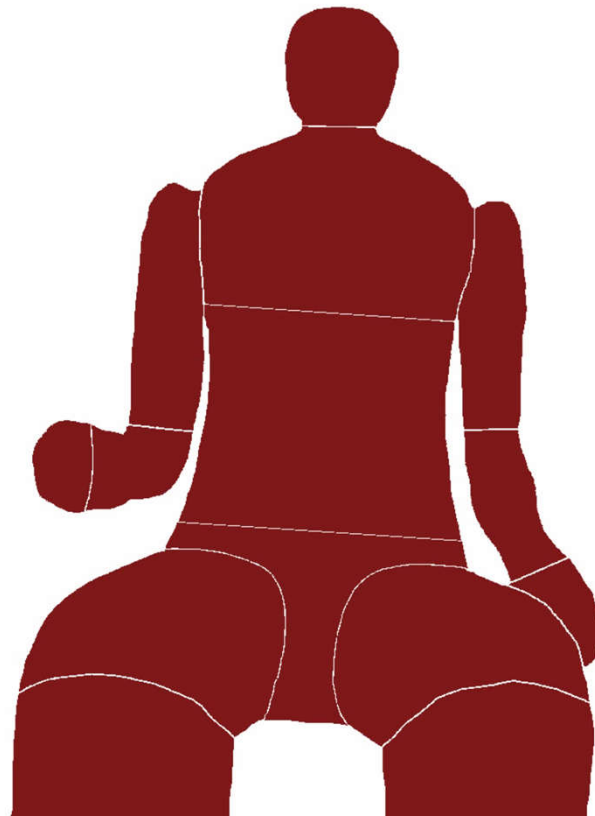


time [min] : 0.0



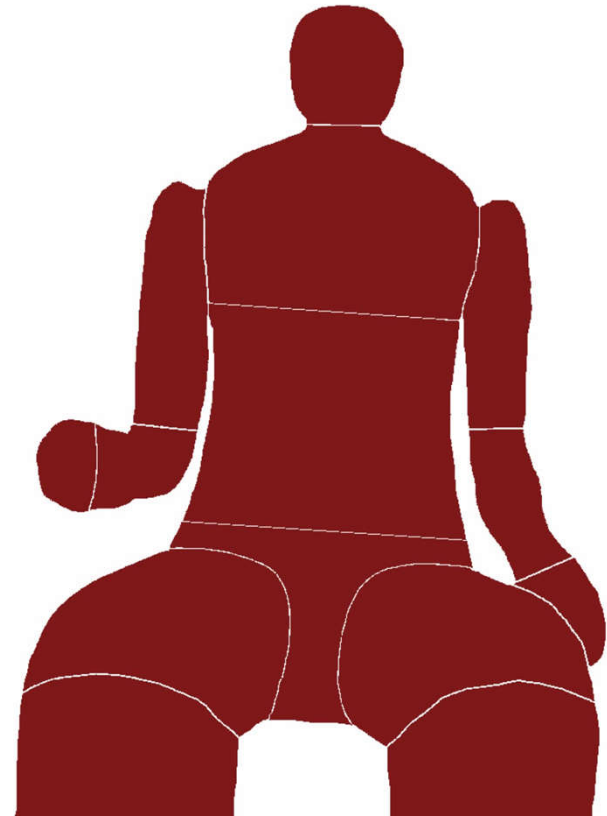
Mischlüftung

time [min] : 0.0



Bodenseitige Verdrängungslüftung

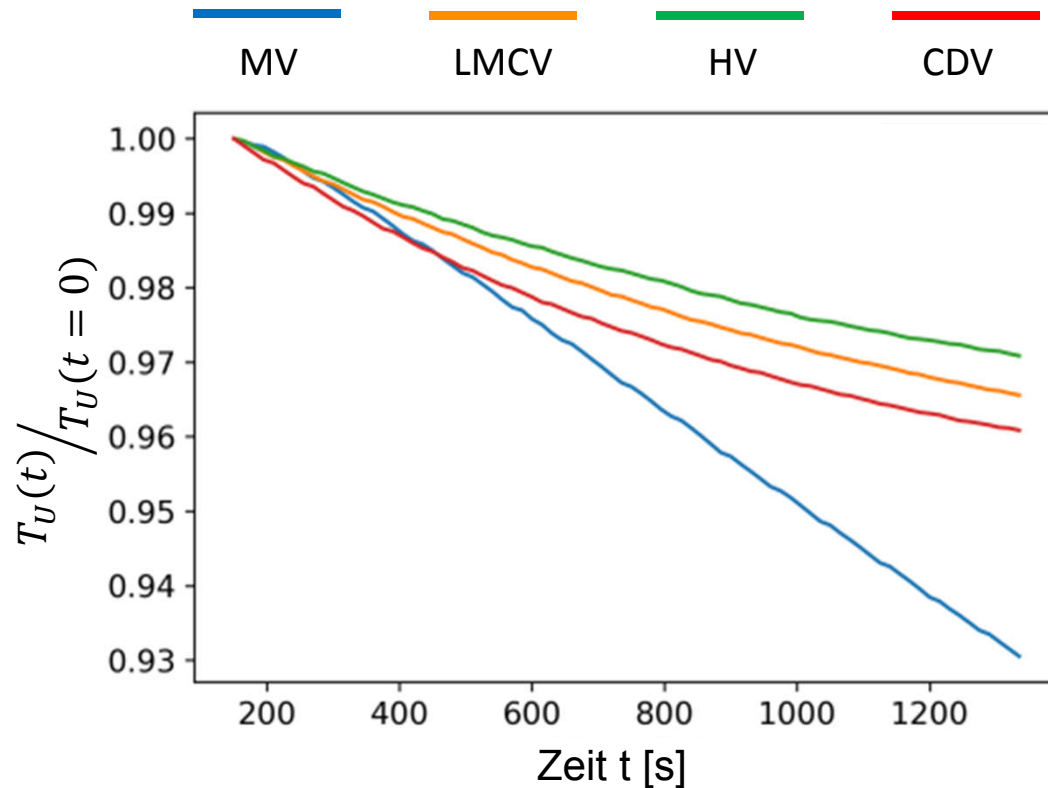
time [min] : 0.0



Niederimpuls Deckenlüftung



Temperatur der Seitenwand



- Kühlen der Seitenwände unterschiedlich
- Deutliche Unterschiede zwischen vertikalen und horizontalen Lüftungskonzepten
- Abkühlung deutlich geringer im Fall der vertikalen Lüftungskonzepte
- MV deutlich erhöhter Wärmtransfer zwischen Seitenwand und Fluid
- Vergleichbarkeit der Ergebnisse?

Aus Gründen der Vergleichbarkeit Normierung der Äquivalenttemperatur

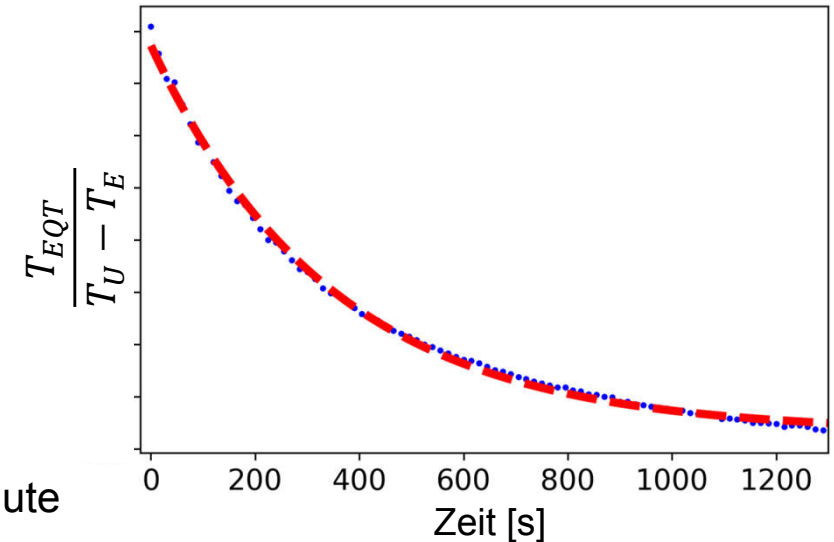




Bewertung der Kühltendenz (Fahrersitz)

	$T_{Eqt}/T_U - T_Z$			
	$\Gamma [-] \sim \Delta T_{Eqt}/\Delta(T_U - T_Z)$		$\alpha [s^{-1}] \times 10^{-3}$	
	$\langle \Gamma \rangle_{KZ}$	σ_Γ	$\langle \alpha \rangle_{KZ}$	σ_α
MV	1.07	0.06	3.25	0.14
CDV	0.37	0.02	1.39	0.16
LMCV	1.46	0.04	3.16	0.04
HV _{50/50}	1.15	0.06	2.20	0.03

- Größte Änderung T_{Eqt} bei gegebenem $T_U - T_Z$ für LMCV und gute Homogenität über die Körperzonen
- Gute Änderung T_{Eqt} bei MV und HV aber große Streuung
- Geringste Änderung für CDV
- Schnellste Dynamik bei MV und LMCV
- Gleichmäßiges Kühlen bei LMCV für alle Körperzonen / MV inhomogene Dynamik
- Deutlich schlechtere Dynamik für HV und besonders CDV

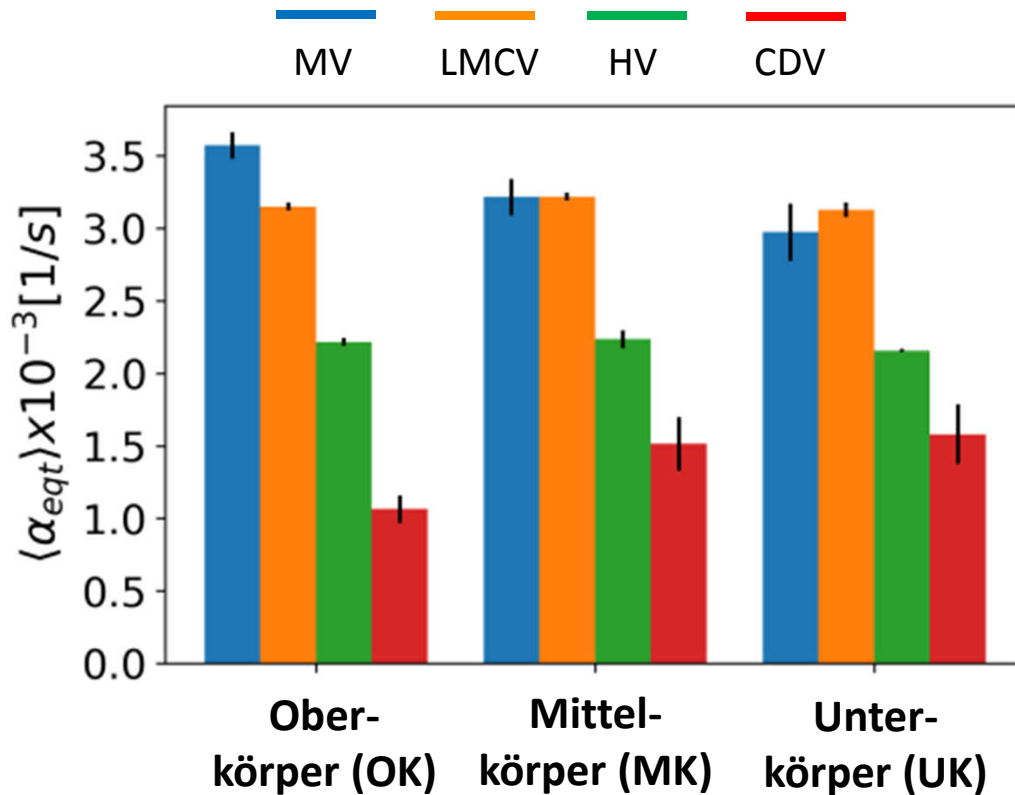


$$\frac{T_{Eqt}}{T_U - T_Z} = \Gamma e^{-\alpha t - 1} + C$$

Vorteile für MV und LMCV in der Gesamtbewertung



Dynamik Körperregionen (Fahrsitz)



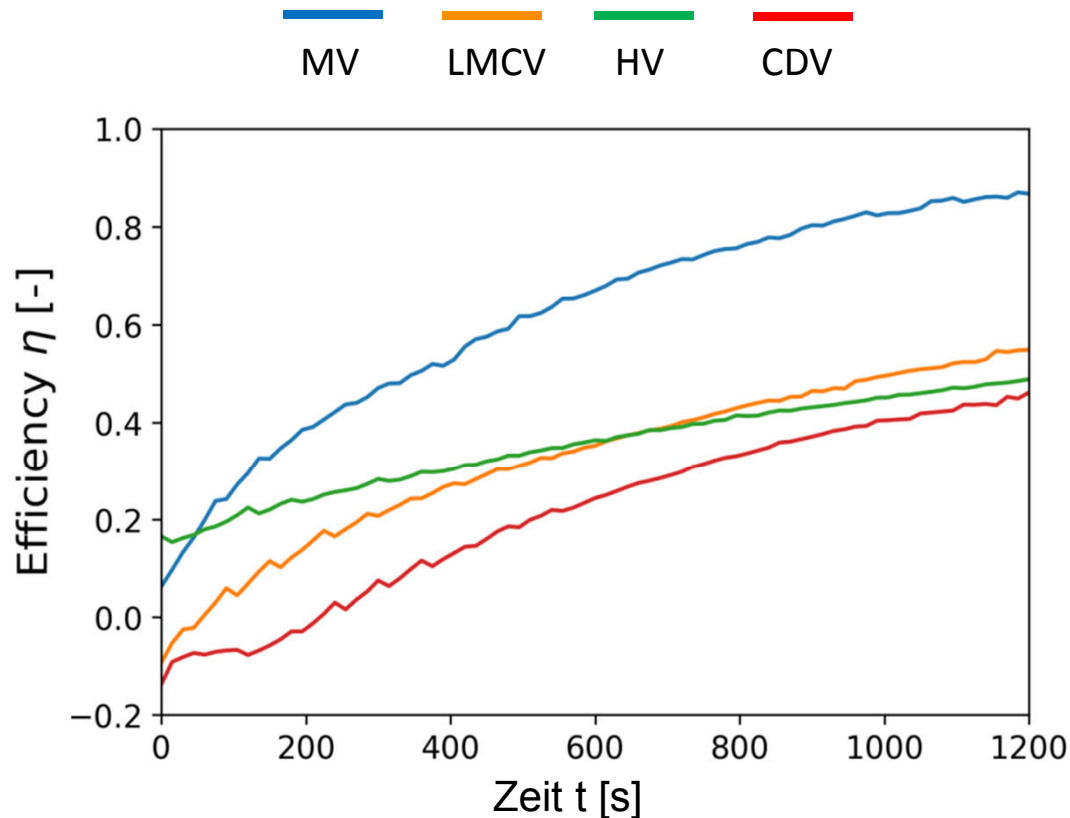
- Hoher Zuluftimpuls bei MV am Kopf und Brustbereich / besserer Wärmetransfer
 - Beste Dynamik für MV am OK
 - Durch Mischung gute Dynamik auch MK und UK
- Bei LMCV schwere kalte Luft sinkt ab und verdrängt warme Luft
 - Schnelle Dynamik
 - Gleiche Dynamik über alle Körperzonen
- Frischluftsee im Bodenbereich aus Kaltluft im Fall von CDV
 - Schlechte Dynamik da kalte Luft aufgrund der größeren Dichte am Bodenbereich verbleibt
 - Kühlt die Fahrzeugstruktur am Boden aber nicht den Passagier



LMCV und MV beste Dynamik über alle Körperregionen

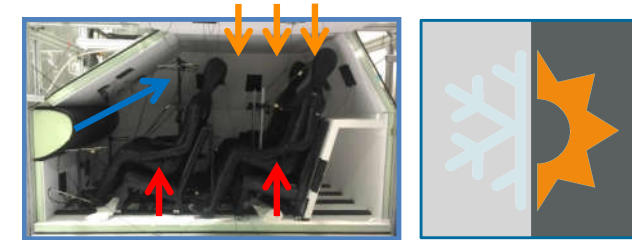


Temperaturregeleffizienz (Fahrersitz)



$$\eta = \frac{T_{Eqt} - T_U - (P_{TM} / \dot{M} \cdot c_p)}{T_Z - T_U}$$

- Großer Impuls an Zuluft führt einer schnelleren Temperaturänderungen der Äquivalenttemperatur → deutlich besseren Temperaturregeleffizienz bei MV in den ersten 20 Minuten
- MV nach 20 Minuten $\eta \approx konst.$
- CDV, LMCV und HV kontinuierlicher Anstieg auch nach 20. Minuten



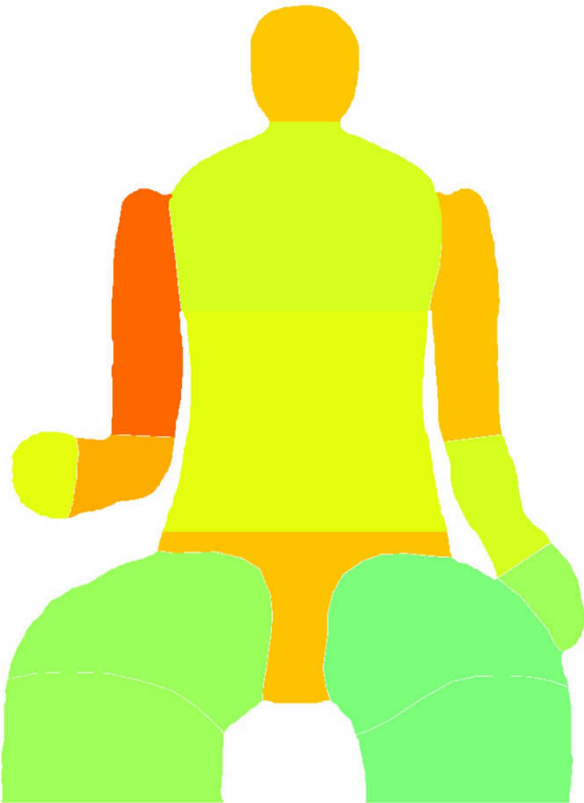
MV Faktor 2 bessere Temperaturregeleffizienz in den ersten 20 Minuten



Äquivalenttemperatur Winterszenario (Fahrersitz)

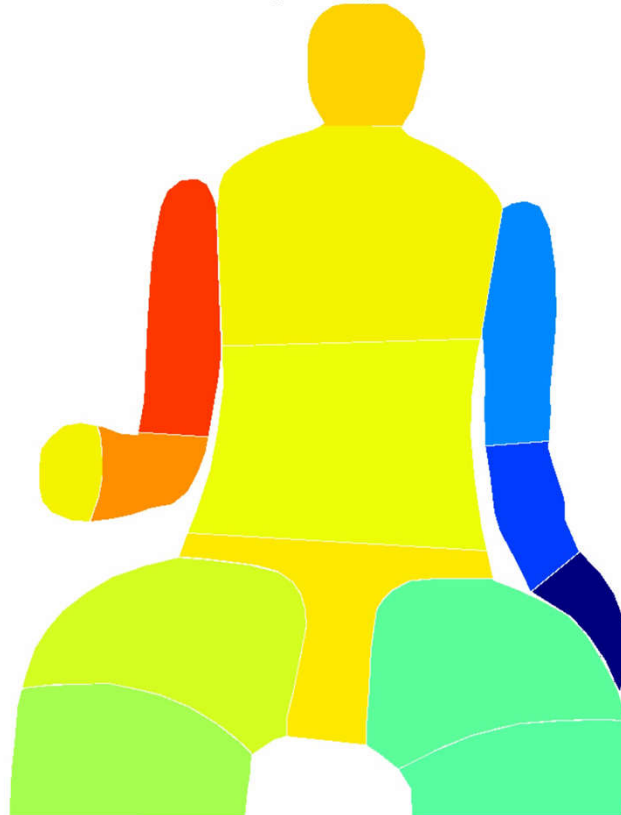


time [min] : 0.0



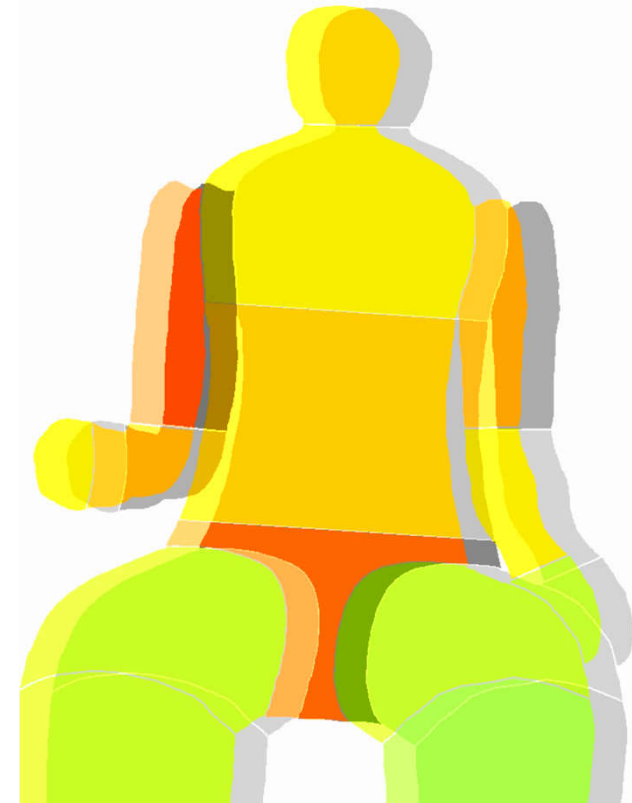
Mischlüftung

time [min] : 0.0

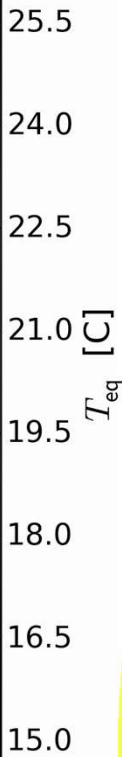


Bodenseitige Verdrängungslüftung

time [min] : 0.0



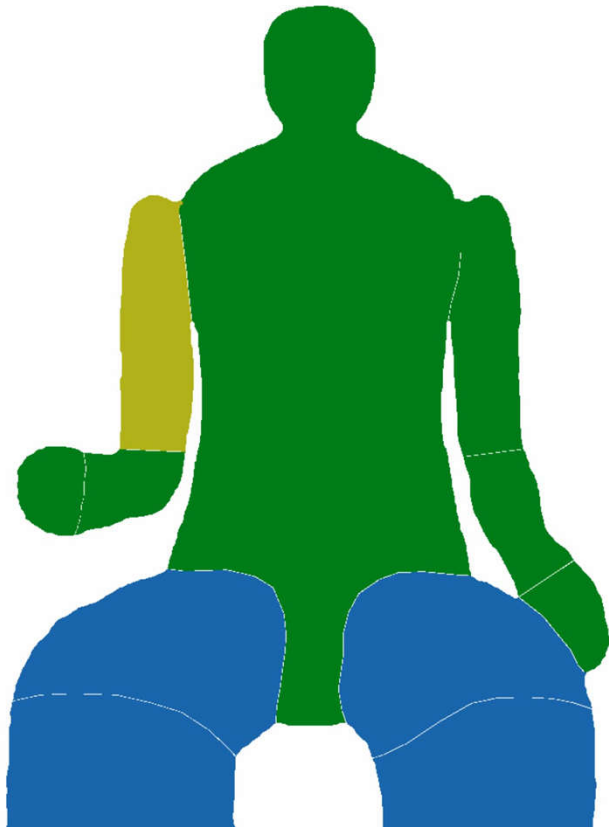
Niederimpuls Deckenlüftung



Thermischer Komfort DIN14505 Winterszenario (Fahrersitz)

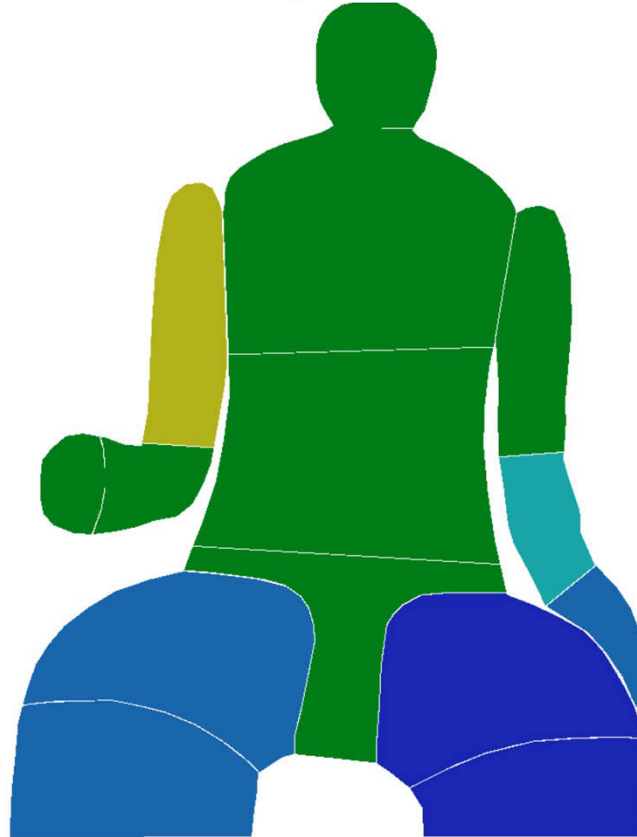


time [min] : 0.0



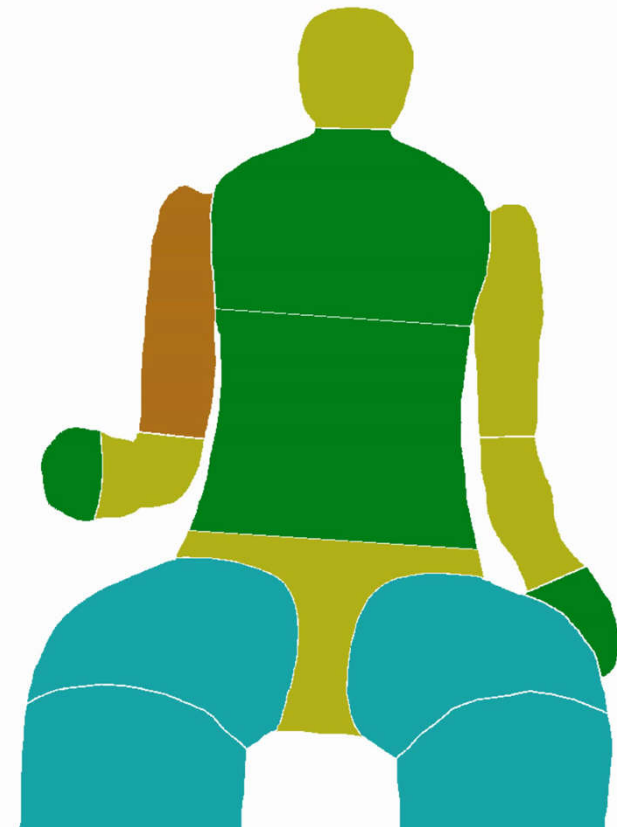
Mischlüftung

time [min] : 0.0



Bodenseitige Verdrängungslüftung

time [min] : 0.0



Niederimpuls Deckenlüftung

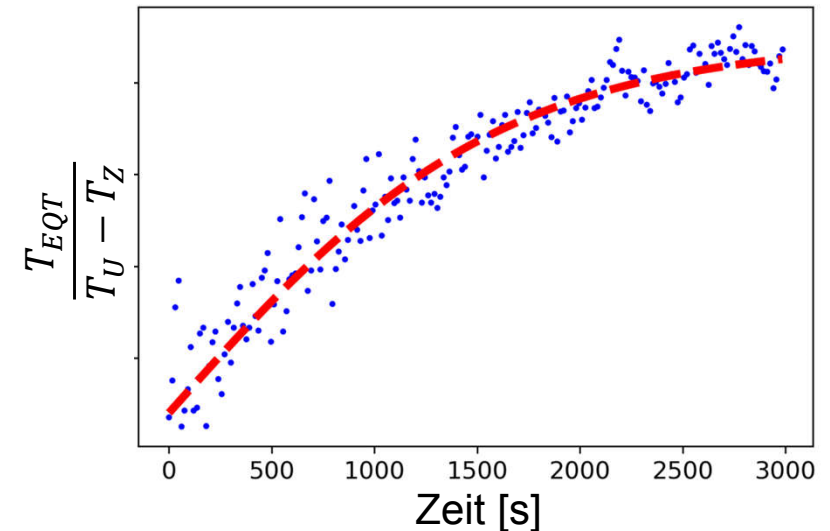




Bewertung der Heizdynamik (Fahrsitz)

	$T_{Eqt}/T_U - T_Z$			
	$\Gamma [-] \sim \Delta T_{Eqt}/\Delta(T_U - T_Z)$		$\alpha [s^{-1}] \times 10^{-4}$	
	$\langle \Gamma \rangle_{KZ}$	σ_Γ	$\langle \alpha \rangle_{KZ}$	σ_α
MV	0.022	0.002	2.7	0.4
CDV	0.037	0.004	3.9	0.2
LMCV	0.057	0.005	7.1	1.5
HV _{50/50}	0.119	0.007	5.1	0.1

- Größte T_{Eqt} Änderung im Verhältnis zu $T_U - T_Z$ für HV
- Kleines Γ für MV, CDV und LMCV
- Schlechte Dynamik für MV und CDV
- Beste Dynamik für LMCV aber große Streuung über die Körperregionen
- HV gute Dynamik und homogenes Heizen über alle Körperzonen

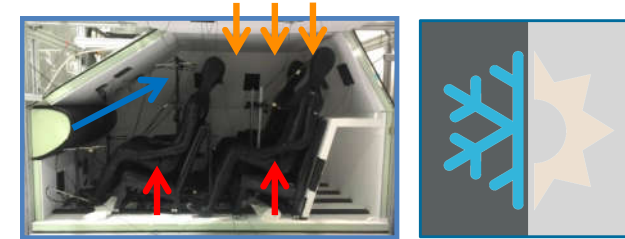
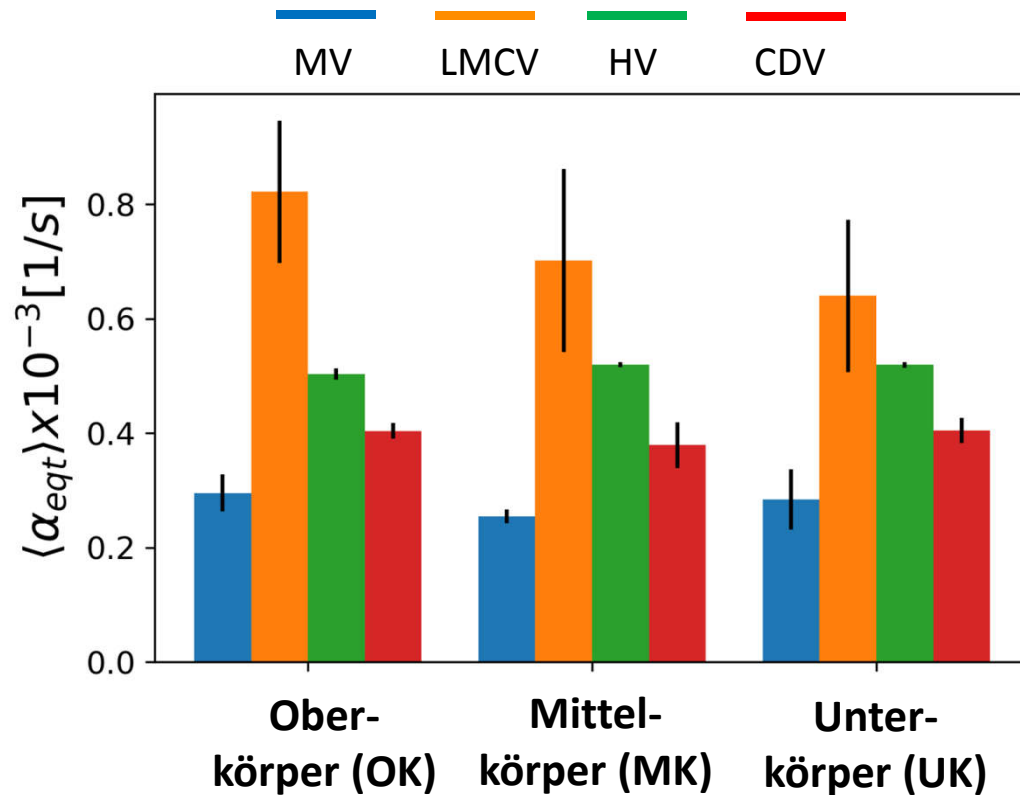


$$\frac{T_{EQT}}{T_U - T_E} = \Gamma \tanh(\alpha t + 1) + C$$

Vorteile für HV in der Gesamtbewertung



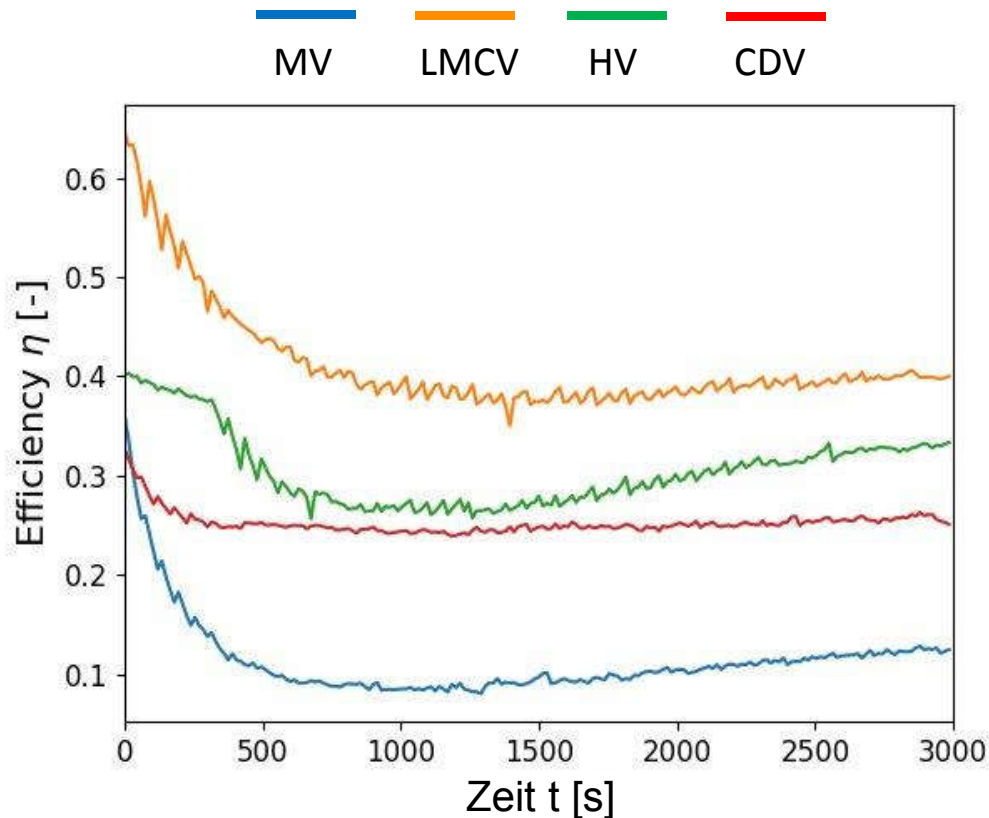
Dynamik Körperregionen (Fahrsitz)



- **LMCV:** Die durch die Passagiere induzierte Auftriebsströmung sorgt für Unterdruck am Boden und Wärme Luft aus dem Deckenbereich strömt nach unten
 - Beste Dynamik für in allen Körperregionen
 - Inhomogenität durch großskalige thermische Strömungsstrukturen
- **CDV:** Wärme Luft strömt am Körper nach oben aufgrund des Auftriebs
 - Deutliche schnelle Dynamik am Bodenbereich
- **MV:** Aufgrund des großen Impulses großer Wärmetransfer zwischen Wand und Luft
 - Deutlich kältere durchschnittliche Lufttemperatur und am Passagier im Vergleich zu vertikaler Lüftung
- **HV:** Gute und homogene Dynamik

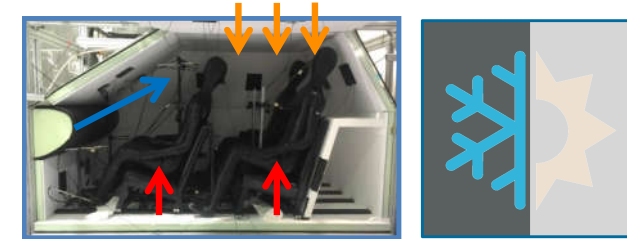


Temperaturregeleffizienz (Fahrersitz)



$$\eta = \frac{T_{Eqt} - T_U - (P_{TM} / \dot{M} \cdot c_p)}{T_E - T_U}$$

- Temperaturregeleffizienz deutlich schlechter bei MV / starke Abnahme für $t < 600$ s
- LMVC beste Effizienz trotz Abnahme $t < 500$ s
- Deutliche Unterschiede in der Dynamik:
 - MV, LMCV fallend und nach ca. 10 Minuten $\eta \approx \text{konst.}$ | MV nach 20. Minuten leicht steigend
 - HV fallend, nach ca. 10 Minuten $\eta \approx \text{konst.}$ und nach 20 Minuten steigend
 - CDV anfangs leicht fallend danach nahezu konstant



Effizienz für die vertikalen Ventilationskonzepte deutlich besser im zu MV



Zusammenfassung / Bewertung

- Definition thermischer Komfort im Fahrzeug
 - Einflussgrößen
 - Wärmetransportmechanismen
 - Bewertung auf Basis DIN14505
- Thermisches Menschmodell
 - Simulation der Versperrung und Wärmeabgabe eines Menschen
 - Messmittel für den thermischen Komfort
- Definition und Charakterisierung der vertikalen Ventilationskonzepte
- Versuchsträger Generische (GFZK)
- Untersuchung der Ventilationsdynamik für Sommer- / Winterszenario

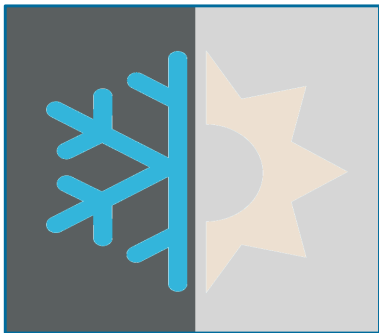


Zusammenfassung / Bewertung

* Temperaturregeleffizienz



	Dynamik TM	$\Delta T_{Eqt} / \Delta(T_U - T_Z)$	Homogenität	TRE*
MV	+	○	○	+
CDV	-	-	-	-
LMCV	+	+	+	○
HV _{50/50}	○	○	+	-

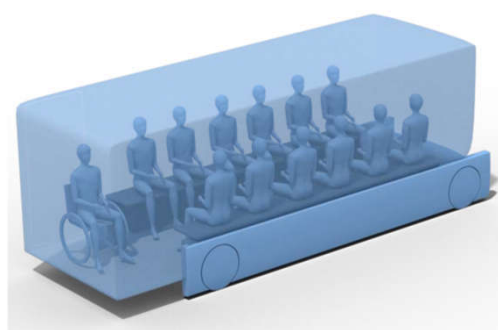
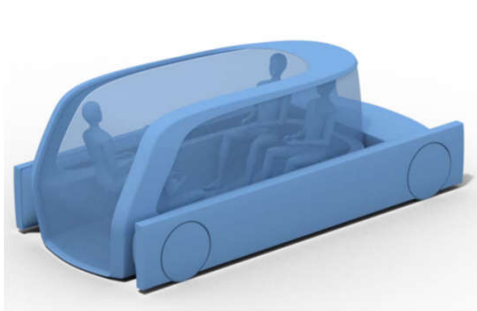


	Dynamik TM	$\Delta T_{Eqt} / \Delta(T_U - T_Z)$	Homogenität	TRE*
MV	-	-	+	-
CDV	-	-	+	○
LMCV	+	-	-	+
HV _{50/50}	○	+	+	○

Vertikale Lüftungskonzepte zeigen großes Potential im Fall des Heizens /
Beim Kühlen MV leicht im Vorteil zu LMCV



Ausblick Ventilationskonzepte beim autonomen Fahren



Untersuchung zum Einsatz vertikaler Lüftungskonzepte beim autonomen Fahren



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

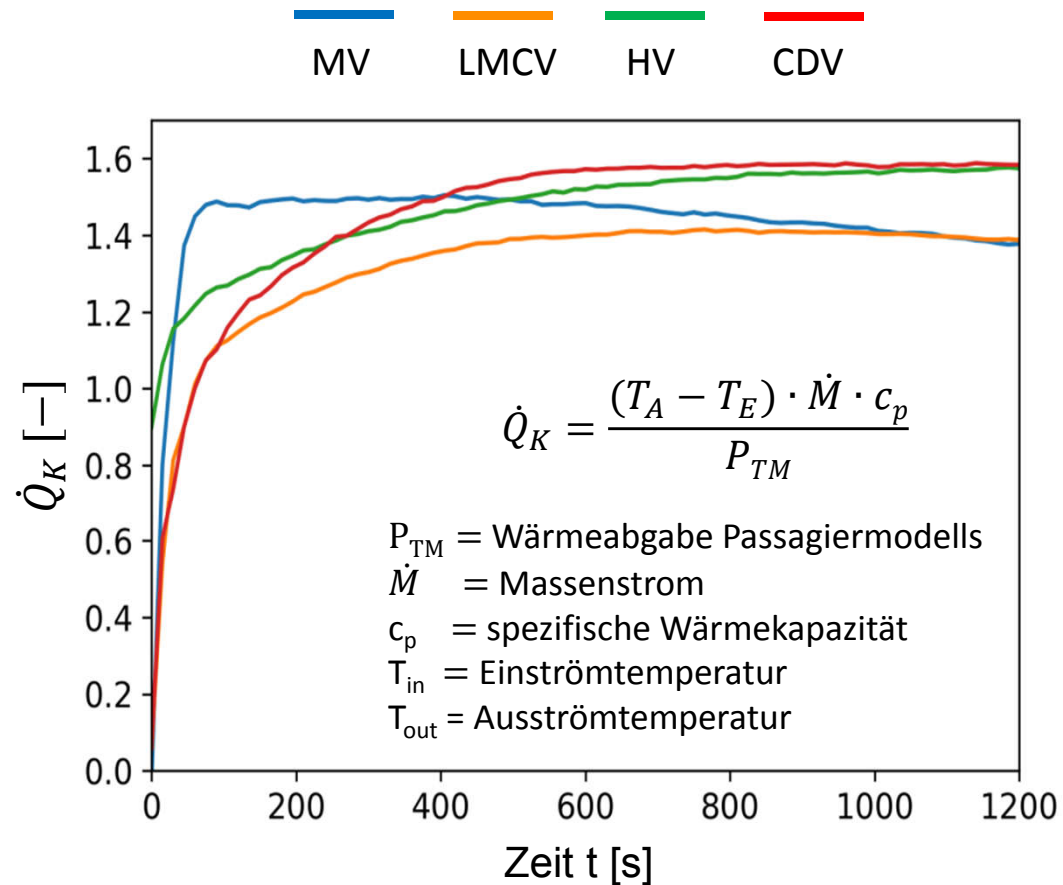
Dr. rer. nat. Andreas Westhoff
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik
Abt. Bodengebundene Fahrzeuge (AS-BOA)
Bunsenstraße 10, 37073 Göttingen

E-Mail: andreas.westhoff@dlr.de

A large, curved image of the Earth from space occupies the right half of the slide. It shows a blue horizon, white clouds, and green landmasses, including parts of Europe and Africa.

Knowledge for Tomorrow

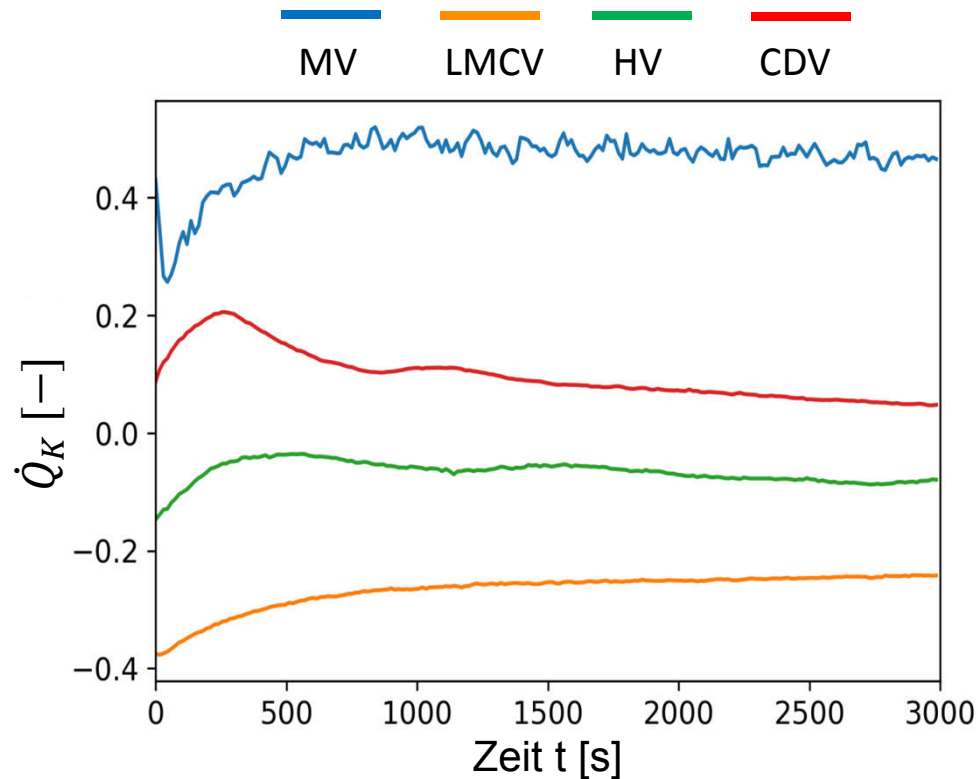
Enthalpie Fahrzeugkabine



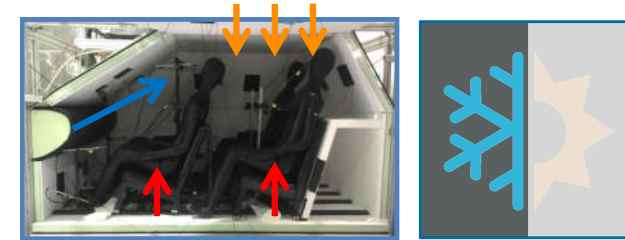
- Schnelle Dynamik (Mischung Kabinenluft und Zuluft) bei MV und HV in den ersten 50s
 - MV: hoher Zuluftimpuls
 - HV: Gleichzeitig Zuluft am Boden und Decke
- Langsamere Mischung bei CDV und LMCV
- Hohe Enthalpie (Mischung Kabinenluft und Zuluft) bei MV und HV in den ersten 50s
- Für $t > 400$ s MV abnehmende Enthalpie
 - kleinerem $(T_A - T_E)$ wegen kälter werdender Fahrzeuginnenwand
 - Großer Wärmetransfer zwischen Wand und Luft
- Für $t > 600$ s konstante Enthalpie / thermisches Gleichgewicht für CDV / HV / LMCV
 - Konstanter / kleinerer Wärmetransfer zwischen Wand und Luft



Enthalpie Fahrzeugkabine



$$\dot{Q}_K = \frac{(T_E - T_A) \cdot \dot{M} \cdot c_p}{P_{TM}}$$



- Geringe Dynamik für alle Ventilationskonzepte
- Unterschiedliche Dynamik zwischen vertikalen und horizontalen Ventilationskonzepten $t < 20$ s
 - Abnahme bei MV $t < 20$ s danach steigend
 - LMCV: monoton steigend
 - CDV: $t < 200$ s steigend, dann fallend
 - HV: $t < 200$ s danach konstant
- Durch Mischung und Wärmetransfer zwischen kalter Wand und Kabinenluft große Enthalpie bei MV
- Geringerer Wärmetransfer zwischen kalter Wand und Kabinenluft bei den vertikalen Lüftungskonzepten
 - Deutlich geringere Enthalpie für CDV, LMCV und HV
- Negative Enthalpie bei HV und LMCV höhere (Temperatur am Auslass wie am Einlass)

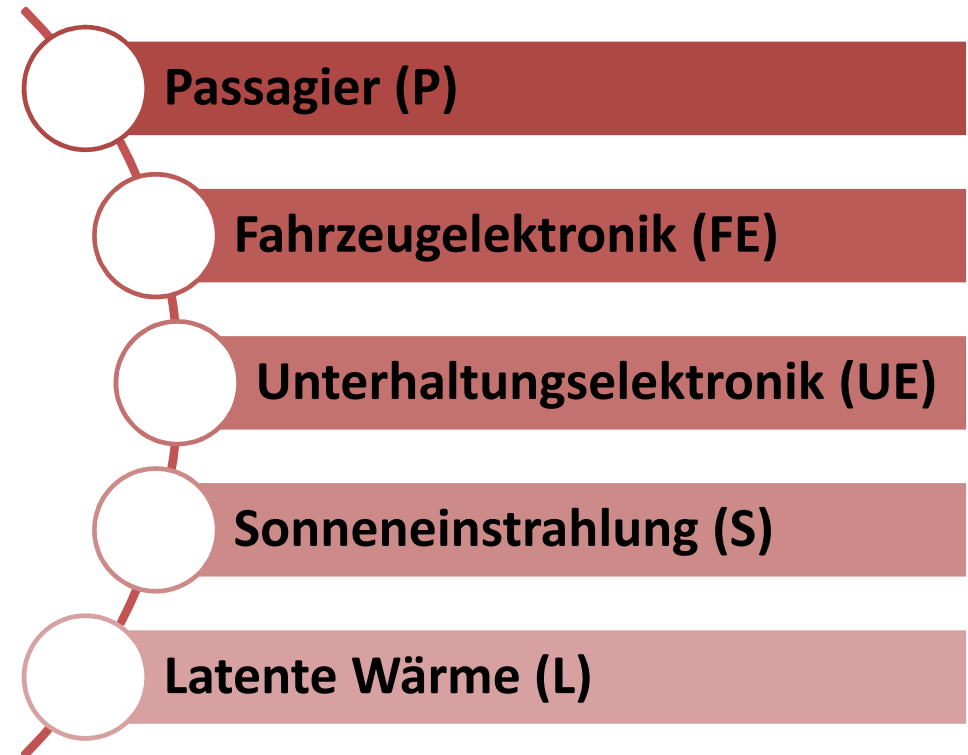
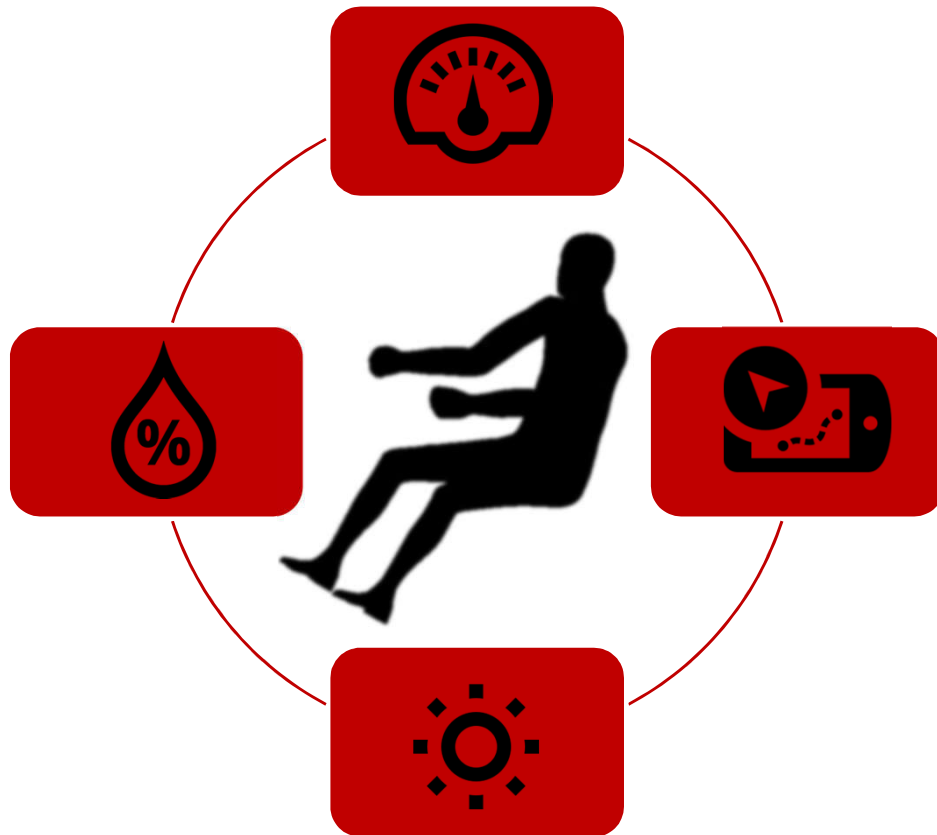


Thermischer Komfort und Kabinenklimatisierung AS-BOA

METHODEN	AUTOMOBIL	ZUGKABINEN	FLUGZEUGKABINEN
Aerodynamik <ul style="list-style-type: none">• Luftströmungen• Strukturbildung• Wärmeströme			
Passagierkomfort <ul style="list-style-type: none">• Äquivalenttemperatur• Probandenversuche• Gesundheit/Sicherheit			
CFD <ul style="list-style-type: none">• Strömungsfelder• Temperaturfelder• Thermischer Komfort			



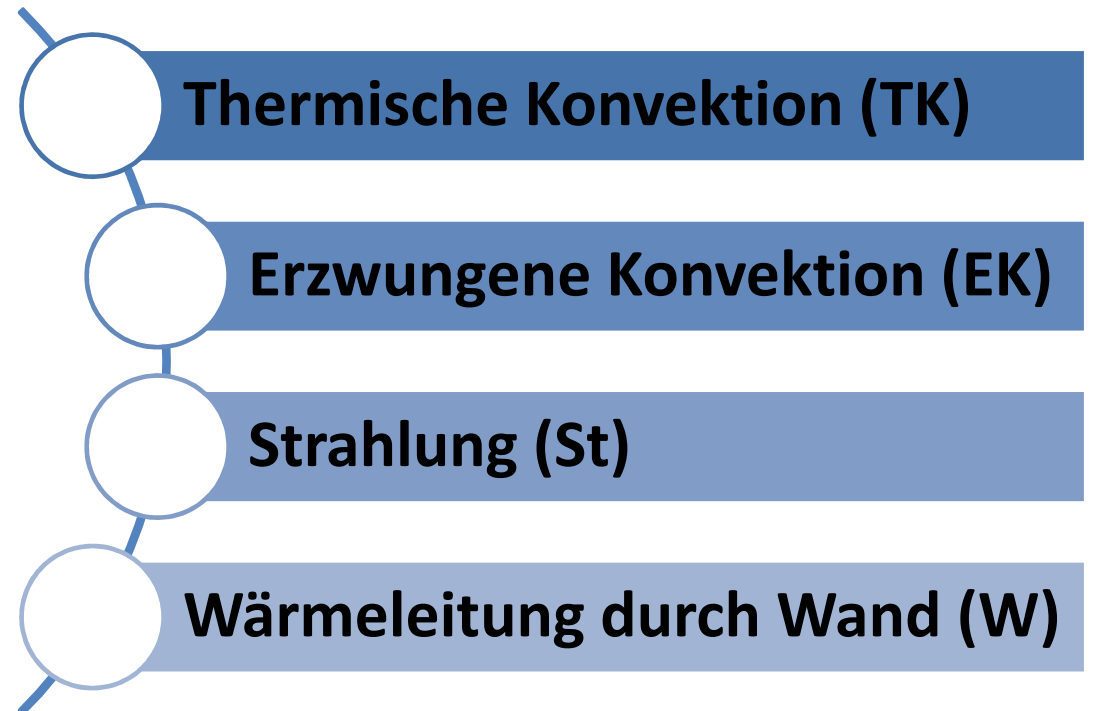
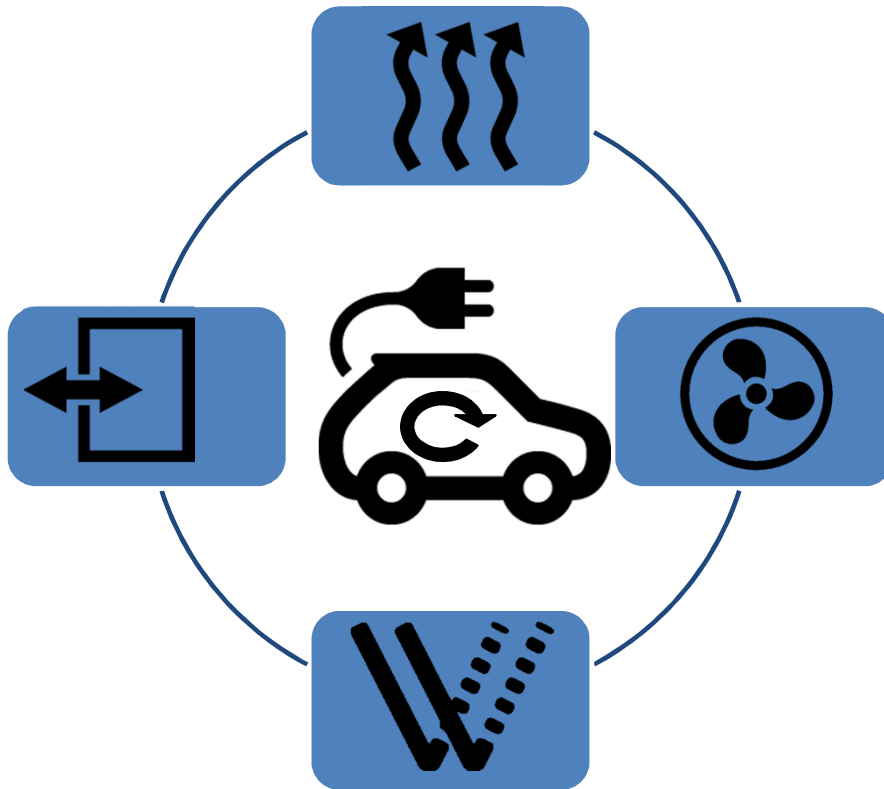
Wärmebilanz – Wärmequellen Fahrzeuginnenraum



$$\dot{Q}_Q = \dot{Q}_P + \dot{Q}_{FE} + \dot{Q}_{UE} + \dot{Q}_S + \dot{Q}_L$$



Wärmetransportmechanismen



$$\dot{Q}_{AC} + \dot{Q}_Q \sim c_p \dot{M} (T_Z - T_A) + \sigma \epsilon (T_P^4 - T_U^4) + \dot{Q}_W$$

